

ACTA ACADEMIAE PAEDAGOGICAE AGRIENSIS

NOVA SERIES TOM. XXXI.

SECTIO PHYSICAE



REDIGIT
LÁSZLÓ UJFALUDI



EGER, 2004

290.996

**AZ ESZTERHÁZY KÁROLY FŐISKOLA
TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEI
ÚJ SOROZAT XXXI. KÖTET**

**TANULMÁNYOK
A FIZIKAI TUDOMÁNYOK
KÖRÉBŐL**

R 576 L 6

Eszterházy Károly Főiskola.
Kutató



* 146809*

**SZERKESZTI
UJFALUDI LÁSZLÓ**

EGER, 2004

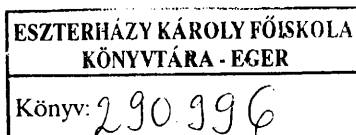
ACTA
ACADEMIAE PAEDAGOGICAE
AGRIENSIS

NOVA SERIES TOM. XXXI.

SECTIO PHYSICAE

REDIGIT
LÁSZLÓ UJFALUDI

EGER, 2004



ISSN 1786-4461

A kiadásért felelős:
az Eszterházy Károly Főiskola rektora
Megjelent az EKF Líceum Kiadó gondozásában
A szedés az EMT_EX—JAT_EX szövegformázó programmal történt
Igazgató: Hekeli Sándor
Felelős szerkesztő: Rimán János
Műszaki szerkesztő: Rimánné Kormos Ágnes
Megjelent: 2004. november Példányszám: 100
Készült: B.V.B. Nyomda és Kiadó Kft., Eger
Ügyvezető: Budavári Sándor



Előszó

Tizenhárom év után a Fizika Tanszék újra önálló kötettel jelentkezik a Tudományos Közlemények sorozatában. A legutóbbi kötet megjelenése óta nagy változások történtek a világban és hazánkban is. A globális változásokat és azok lehetséges kimenetelét elemzi a kötetet indító tanulmány. Szerzője *Végh László*, a Debreceni Atommagkutató Intézet főmunkatársa; kutatási területe az elméleti magfizika. Az utóbbi tíz évben azonban az emberiség olyan nagy problémái foglalkoztatják, mint a fenntartható fejlődés, a természettudomány és a vallás viszonya, a globális környezet problémái. Nagy sikerű egyetemi előadásai is ezekre a témákra épülnek. Ebben a tanulmányában azt az alaptézist fejti ki, amely szerint egy civilizáció születése és léte a természetes környezetre — sajnos, törvénytörően — pusztító hatással van. *Végh László* előadásában, könyveiben a próféták elhivatottságával figyelmeztet a civilizáció veszélyeire és mutat irányt a helyes és követendő cselekvésre.

Az emberiség túlélésének egyik kulcskérdése az energia. Az energiaprobléma egyik lehetséges megoldása lehet a fúziós energia. Ez a témája *Rácz Ervin* cikkének. Szerzője korábban főiskolánk fizika szakos hallgatója volt, majd az egyetem elvégzése után lézerfizikai kutatásokkal kezdett foglalkozni. Tanulmányában, amely a magfúciónak lézerek segítségével megvalósítható változatát ismerteti, saját kutatásairól is beszámol.

A rendszerváltás szűkebb környezetünkben is jelentős változásokat hozott. A felsőoktatásban a hallgatók száma 3-4-szeresére nőtt, de sajnos, a fizika szakos tanárképzésben fordított trend érvényesült. A helyzet romlása összefügg a természettudomány iránti érdeklődés visszaesésével. Az okoknak eredt nyomába a harmadik tanulmány szerzője, *Vida József*. Kollégánk hosszú évek óta minden energiáját latba vetve igyekszik javítani a fizikatanítás színvonalát. Meggyőződése, hogy a diákok érdeklődését a tárgy iránt leginkább a kísérletezéssel lehet felkelteni; ezzel kapcsolatos tapasztalatait továbbképzések és bemutatók során adja át a közoktatásban tanító kollégáinknak. Az utóbbi években statisztikai módszerekkel is megkísérli feltárni a fizika csökkenő népszerűségének okait, és kijelölni a jobbítás útvonalaait. Erről szól itt közölt tanulmánya.

A fizikának a sportban történő alkalmazása új tudományággá nőtte ki magát, amelynek neve biomechanika. *Kovách Lászlóné* kolléganőnk tanulmánya bemutatja, hogy a fizikai ismereteket hogyan lehet hasznosítani a ritmikus sportgimnasztikában használatos karikagyakorlatokban.

A fizikai módszereket gyakran sikerrel alkalmazzák a fizikától távol eső területeken is, pl. a biológiában és a hidrogeológiában; ezekre mutat példát a

kötet két utolsó tanulmánya. *Rajkai Kálmán és szerzőtársai* a nagyfrekvenciás áram alkalmazását mutatják be növényi gyökerek fejlődésének nyomon követésére. Rajkai Kálmán biológusként dolgozik az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetében. Mindig is különleges hajlama volt (a legtöbb biológustól eltérő módon) a fizikai módszerek alkalmazására. Itt megjelent tanulmánya akadémiai doktori értekezésének egyik fejezete. Jómagam főiskolai oktatóként sem tudtam (és nem is akartam) megtagadni kutatóintézeti múltamat. A kötetet záró tanulmányban az alacsonyfrekvenciás áram hidrológiai alkalmazásáról adok ismertetést. Elektromos mérésekkel ugyanis nemcsak a gyökerek növekedéséről, hanem a vízellátásban oly fontos talajvíztartó rétegek szerkezetéről is hasznos információkat nyerhetünk.

A kötet hat tanulmánya tehát igen változatos képet ad a fizika korunkban egyre szélesedő alkalmazási lehetőségeiről. Bízva abban, hogy munkánk eredménye érdeklődésre tarthat számot, ez úton ajánlja a kötetet a tisztelt Olvasó figyelmébe a szerkesztő:

Ujfaludi László

A civilizáció hatása környezetére

Végh László

MTA ATOMKI, Debrecen

Abstract. The effect of a civilization on its environment. According to the general laws of physics the birth and existence of a civilization has a destructive effect on its natural environment. We analyze the history of the use of energy and raw materials. We discuss that the success of the green revolution in the second half of the XX. century involves fatal consequences for the history of the XXI. century.

I. Bevezetés

Az ember, az emberi civilizáció megjelenése a világegyetem történetének része. A mindenség történetét tanulmányozva láthatjuk, hogy az idő teltét egyre bonyolultabb rendszerek megjelenése jelzi ([1]). Általában azt mondhatjuk, hogy a kialakult összetett rendszerek még kifinomultabb, méginkább összetett rendszerek hordozóiként szolgálhatnak. Ilyen összetettebbé válási folyamatban alakultak ki a csaknem egyenletes sűrűségű hidrogén- és héliumgázból álló, táguló és hűlő világegyetemben a csillagrendszerek és a csillagok. Az egyes csillagok belsejében összeálltak a nehezebb elemek, majd szilárd anyagú bolygókat is tartalmazó naprendszerek keletkeztek. Az igen kedvező feltételeknek köszönhetően bolygónk felszínén megjelent az élet, majd évmilliárdok múltán, a biológiai törzsfajlódás során kb. százötvenezer évvel ezelőtt az élet eljutott a mai értelmes ember megjelenéséig. Az új, összetettebb rendszerek az őket hordozó rendszerekkel bonyolult kölcsönhatásban állnak. A törzsfajlódás alapelvei szerint a megjelenő új fajnak akkor van jövője, ha képes alkalmazkodni a környezetéhez, illetve a környezete erőforrásaiért való harcban meg tud maradni. A fajnak a környezethez való viszonya azonban ennél jóval bonyolultabb. Egy faj az anyagcseréje és egyéb tevékenysége során módosítja helyi és tágabban értelmezett környezetét, részben rombolva, részben építve azt.

Ezért maga a törzsfajlódás is egy, az egyes fajok által állandóan változtatott, alakított környezetben zajlik. Ez azt jelenti, hogy a törzsfajlódése

menetét nem pusztán az élettelen környezet, mint a hőmérséklet, nedvesség stb. szabja meg, hanem maga a környezet is együtt változik és fejlődik a benne élő szervezetekkel ([2]).

A különböző fajok azt teszik, amit genetikai örökségük megszab számukra. Környezetük változtatását is génjeik által előírt módon végzik. Az ember viszont nem egyszerűen csak génjei szerint meghatározottan, mondhatni génjeinek gépezeteként tevékenykedik, hanem elsősorban a nemzedékek során felhalmozott tapasztalatot, tudást felhasználva változtatja környezetét. Ezért az ember, az emberi civilizáció környezetét alakító hatása sokkal nagyobb mértékű és más jellegű, mint amilyenre az egyéb fajok képesek lehetnek.

Egy faj a környezetében olyan változásokat okozhat, amelyek a faj kipusztulásához vezethetnek. Jó példa erre a Bering-tengeri Szent Máté-szigetre telepített rénszarvasok esete. A szigetet, amíg nem élt rajta rénszarvas, tíz centiméter vastag zuzmó borította. 1944-ben egy 29 állatból álló rénszarvascsordát telepítettek a szigetre. 1957-ben már 1350 egyed élt ott, 1963-ban pedig 6000. Addigra lelegették a zuzmót, és 1963—1964 kemény tele végzett a csordával. A tavaszt csak 41 tehén és egy terméketlen bika élte meg ([3]). Ez a kipusztulás szinte törvényszerű volt, mivel a rénszarvasok felszabadultak a létszámukat szabályzó hatások alól. Egyrészt nem ritkították meg őket a ragadozók, másrészt nem vándorolhattak máshová, ezért a zuzmó nem újulhatott meg.

Az emberi történelmet tekintve is láthatjuk, hogy idővel egyre bonyolultabb munkamegosztási rendszerekkel, összetettebb intézményekkel jellemzett civilizációk jelenhetnek meg. Az egyes civilizációk alapvető jellegzetességeit a környezetükhöz való viszony szabja meg, és a civilizáció által átalakított környezet változásai a civilizáció történetének menetét is nagyban befolyásolhatják.

Ebben a dolgozatban azt az általános kérdést vizsgáljuk, hogy milyen kölcsönhatások jellemzik a civilizáció és a természetes környezet kapcsolatát, és milyen veszélyek fenyegetik a mai civilizációt.

A következő fejezetben a civilizáció és a környezet kapcsolatának elemzéséhez használt fogalmakkal ismerkedünk meg.

II. Az önszerveződés alapelveiről

Az emberi közösségek, társadalmak és civilizációk kialakulásának, fennmaradásának és fejlődésének tárgyalása nagyon összetett feladat. Mégis, a fizika néhány alapvető fogalmát felhasználva lényeges megállapításokat tehetünk a közösség, a társadalom és a civilizáció milyenségéről, viselkedéséről.

Ezek ugyanis sokelemű rendszert alkotnak, és a fizika ilyen rendszerekre kapott általános eredményei, ha kissé áttételes módon is, de felhasználhatók a közösség, a társadalom és a civilizáció leírásához. Mindezekhez először át kell tekintenünk azt, hogy a fizika mit mond a sok elemből álló rendszerek jellemzőiről. Először az entrópia fogalmával ismerkedünk meg, majd az önszerveződő rendszereket vizsgáljuk.

Az entrópia

A civilizálódó ember egyik legősibb tapasztalata, hogy a rend teremtéséhez és fenntartásához munka szükséges. Ha a ház vagy a kert magára marad, akkor annak rendje fokozatosan felbomlik, a ház összeomlik, a kert elgyomosodik. Ezt az alapvető tudást a fizika az entrópia fogalmának bevezetésével fogalmazza meg.

Az entrópia az igen sok részecskéből álló rendszerek viselkedését jellemző fizikai mennyiség, a rendszer rendezetlenségének mértéke. Minél rendezetlenebb a rendszer, az entrópiája annál nagyobb. Egy rendszer rendezettsége annál magasabb fokú, minél jobban megzavarja az, ha a különböző helyeken lévő részeit felcseréljük. Példaként gondoljunk arra, ha a rendszer tartályba zárt gáz: a rendszer tulajdonságait nem változtatja meg, ha benne két térfogatelemet felcserélünk. Ekkor a rendszer rendezetlen, az entrópiája magas. A rendszer entrópiája ezért akkor a legnagyobb, ha teljesen egyöntetűvé, kiegyenlítetté válik. Ekkor ugyanis a felcserélődések semmit sem változtatnak a rendszer tulajdonságain.

Az olyan rendszer viszont, amelyek kifinomultabb összetételű, kis entrópiájú. Ugyanis bennük egy felcserélés tulajdonságok módosulását hozhatja magával. Gondoljunk arra, hogy az élő sejt működése mennyire megsérülhetne, ha benne két kis részt felcserélnénk. A rendszer entrópiája a rendszer által hordozott információ mértékével is összefügg. Minél kisebb a rendszer entrópiája, a rendszer annál több információt tartalmaz. Információ létrehozásához munka szükséges, ezért az alacsony entrópiájú rendszerek létrejöttéhez energiát kell befektetni.

A fentiek szerint a rendszer rendezettségét nem annyira a katonás rend jellemzi. A díszmenet ugyanaz marad, ha két katonát felcserélünk benne. A menet annyiban rendezett, hogy megváltozik, ha egy katonát és egy sorközt tartalmazó térrészt felcserélünk.

A szabályos, kristályrácsszerű ismétlődéseket tartalmazó rendszer nagy entrópiájú, kevés jellemzővel leírható. Az igazán rendezett rendszer a DNS, amelyben két elem felcserélése súlyos változásokhoz vezethet.

A külvilággal érintkezésben nem álló rendszert zárt rendszernek nevezük. A termodinamika II. főtétele szerint zárt rendszerben az entrópia nö-

vekszik, egészen a lehetséges maximális értékéig. Nézzük az alábbi egyszerű példát.

Ha vízbe valamilyen benne oldódó anyagot teszünk, akkor az hamarosan egyenletesen oszlik el. Ha ez az anyag egyúttal valamilyen festék, például hipermangán, akkor a folyamat szemmel is jól követhető. A kezdeti állapot, amikor a szemcse molekulái együtt voltak, alacsonyabb entrópiájú, merthogy rendezettebb, mint amikor a szemcse egymástól eltávolodott molekulái a teljes térfogatban egyenletesen oszlanak el.

Egy rendszer entrópiája akkor maradhat alacsony, ha a rendszer nem marad magára, hanem kölcsönhatásban áll a környezetével. A kölcsönhatás során lezajló energiacsere tartja fenn a rendszer rendezettségét. Az entrópia növekedésének feltétele meghatározó következményekkel jár a magasan szervezett rendszerek keletkezését és fennmaradását illetően. Az, hogy a sokelemű rendszer lehet-e szervezettebb állapotban, a rendszer energiájától is függ.

Önszerveződő rendszerek

Az önszerveződő rendszerek sok energiával rendelkező, valamilyen egyensúlyihoz közeli állapotban található rendszerek.

Az önszerveződés akkor lép fel, ha a rendszer egyes elemei csak néhány, elsősorban a szomszédságban található elemekkel léphetnek kapcsolatba. Helyi változások ugyan a rendszer távolabbi tartományait is befolyásolhatják, de lehet, hogy még nem okoznak az egész rendszert gyökeresen átalakító változásokat. A kölcsönhatási lehetőségek számának növekedésével egyre összetettebb viselkedési módokat tapasztalhatunk. Az önszerveződő rendszer a káosz peremén, a káosz és a rend határán létezik, de amelyet nem a káosz, hanem inkább az egyensúly, a rendszerezettség, bizonyos esetekben igen magasan szervezett mintázatok, mozgások jellemeznek.

Az önszerveződő rendszer nagyon szoros kapcsolatban áll a környezetével, attól elválaszthatatlan. Ezek nem gépezetek vagy merev szerkezetek, hanem inkább folyamatok. Képesek alkalmazkodni a környezet változásaihoz, akár azon az áron is, hogy maguk is átalakulnak. Igyekeznek magukat minden áron fenntartani, és ha arra kényszerülnek, komolyabb változásra is képesek. Maguk is alakíthatják környezetüket. Mennél összetettebb módon képes működni az önszerveződő rendszer, annál erősebben tudja alakítani környezetét úgy, hogy a maga számára kedvezőbb feltételeket teremtsen.

Az önszerveződő rendszer, bár működését igen sokféle folyamat és változásra való képesség jellemzi, bizonyos mennyiségek értékét igyekszik állandónak vagy közel állandónak tartani. Az önszerveződő rendszer folyamatait tanulmányozva láthatjuk, hogy a gazdag mintázatok körfolyamatok, körfolyamatok összekapcsolódása, összjátéka hozza létre.

Az önszerveződő rendszerek nagyon bonyolult viselkedési formákat mutathatnak, és mivel a káosz peremén vannak, néha igen érzékeny válaszokat adhatnak a környezet változásaira. Ezért a jövőjük megjósolhatatlan. Ugyanakkor a külső behatásokra való esetleges rendkívüli érzékenységük azt is lehetővé teszi, hogy bizonyos igen kicsiny külső hatásokkal ellenőrzés alatt lehet tartani viselkedésüket.

Az önszerveződés két legáltalánosabb feltétele

A rendkívül gazdag harmonikus mozgásformákkal és mintázatokkal jellemzett önszerveződő (fizikai, kémiai, biológiai vagy akár társadalmi) rendszerek kialakulásának és fennmaradásának két általános feltétele van. Az egyik, hogy létezzen a rendszer elemei között kölcsönhatás, vagy legyenek kölcsönhatások. Általában elég lehet az is, hogy az elemek csak saját közvetlen szomszédaikkal léphessenek kölcsönhatásba.

A másik általános feltétel az, hogy a rendszer legyen nyitott, azaz álljon kölcsönhatásban a környezettel. Az önszerveződő rendszerek annyira rá vannak utalva a környezettel való állandó kölcsönhatásra, hogy igazából nem is választhatók el attól. Energiát, entrópiát, anyagot cserélnek vele.

Az energia cseréjének kényszere megérthető abból, hogy az önszerveződő rendszer energetikailag az egyensúlyi állapottól távol helyezkedik el. Energiája jóval magasabb, mint az alapállapotú energiaszint. Ezért a fizika alaptörvényeinek megfelelően igyekszik leadni fölös energiáját. Minél összetettebb a rendszer, folyamataiban annál hosszabb ideig képes az energiát tárolni. Példák erre az élő szervezeteket jellemző igen bonyolult kémiai körfolyamatok. Energiát egy idő után viszont így is veszít, és ezért energiafelvételre kényszerül. Szemléletes példaként gondoljunk arra, ahhoz hogy a pingponglabdát egy bizonyos magasság környékén tarthassunk, alulról állandóan ütögetnünk kell.

A nyitottság kényszere következik abból is, hogy a normál állapotban lévő önszerveződő rendszerek entrópiája nagyon alacsony, mivel igencsak rendezettek, szervezettek.

Az alacsony, többé-kevésbé állandó entrópiájú önszerveződő rendszer létezése nem sérti az entrópia növekedését megkövetelő második főtétel működését. Ez ugyanis egy zárt rendszer egészére vonatkozik. Így az önszerveződő rendszerre és a vele kölcsönhatásban álló környezet együttesére már teljesülhet a tétel.

A rendezettségét megőrző önszerveződő rendszer környezetét teszi még rendezetlenebbé. Szemléletes példa lehet egy ilyen, az önszerveződő rendszert és környezetét magába foglaló zárt rendszerre a ketrecbe zárt majom, amely mellé a ketrecbe banánt raknak. Legyen ez kezdeti állapot: a majom

és a banán. A későbbi állapotot az jellemzi, hogy a banán a majom anyagcseréjének termékeivé alakult át. Ha most összehasonlítjuk a kezdeti és a későbbi állapot entrópiáját, a következőket láthatjuk. A majom entrópiája, mivel egészségi állapota nem romlott, változatlan maradt. Az anyagcsere-termékeinek rendezetlensége, mivel azok szervesetlen és egyszerűbb szerves vegyületeket tartalmaznak, azonban jóval magasabb a banánt alkotó cukrok, fehérjék stb. rendezetlenségénél, így ezzel az entrópia növekedésének követelménye teljesül.

Nyilvánvaló, hogy ha nincs jelen a majom, a banán entrópiája akkor is nő, mert a banán barnul, romlik. Viszont az entrópiának az ilyen növekedése nem vethető össze azzal, ami a majom jelenlétében történik, mikor is a banán anyagcsere-termékké alakul át. A banán energiája szétszóródik, a majom anyagcseréje során a levegő hőmérsékletét emeli meg.

A bioszféra mint önszerveződő rendszer

A bioszféra egésze is önszerveződő rendszer. Környezete egyrészt a Föld felszíne, a rajta lévő élettelen anyag. A környezet másik meghatározó eleme a Nap sugárzása, mely az élővilág energiájának és rendezettségének fő forrása.

A bioszféra is, mint bármely önszerveződő rendszer, energiáját tekintve nem alapállapotban, hanem nagy energiájú állapotban van. Az élők összességét alkotó bioszféra energiájának csökkenését az akadályozza meg, hogy a növények a fotoszintézis útján a napenergia egy részét meg tudják kötni. Ez az energia raktározódik el a növények és az állatok testében, szerveskémi vegyületek, körfolyamatok energiájaként. Ha az élő szervezet elpusztul, szerves vegyületei szétesnek, ezzel energiáját elveszti.

A bioszféra rendezettségének magas foka, entrópiájának alacsony értéke is a napsugárzás felhasználásához kapcsolódik. A növény a fotoszintézis során nagy energiájú, vörös színű sugárzást vesz fel. A sugárzás energiáját szerves vegyületekben tárolja. Az energia az anyagcsere és a szerves vegyületek bomlásakor keletkező hőenergiaként szabadul fel, ami a Föld felszínét hősugárzásként hagyja el. Így a bioszféra által felhasznált napsugarak végül is alacsony energiájú hősugárzássá alakulnak. Minél kisebb energiájú a sugárzás, annál nagyobb az entrópiája, tehát a napsugárzás entrópiája jóval alacsonyabb, mint a Földet elhagyó hősugárzás entrópiája.

A bioszféra magas fokú rendezettsége így azon az áron marad meg, hogy a világűr sugárzási tere lesz magasabb entrópiájú. Ha a végső mérleget nézzük, a fotoszintézis során elnyelt foton energiája a hősugárzásban húsz fotonra szétesztődve szóródik szét a világűrben.

A bioszféra önszerveződő rendszerként való létezése az alapja a Gaia-modellnek, amely szerint a teljes bioszférát egyetlen élő organizmusként ér-

telmezhethetjük. A földi élőlények önmagukban, a többi élő nélkül nem létezhetnének. Egymásra vannak utalva, akárcsak egy élő szervezet különböző testrészei. Az élő bonyolult szabályzó mechanizmusok tartják a megfelelő állapotban, biztosítják az élethez szükséges feltételek viszonylagos állandóságát, mint a testnedvek összetétele, vagy akár az emlősöknél a test hőmérséklete.

Az élő szervezethez hasonlóan a bioszféra, a Gaia jellemzői, az élet jelenlegi formáit biztosító feltételek is állandóak. Gondoljunk arra, hogy a tengerek, óceánok sótartalma is állandó. Ennek okát, a szabályzó mechanizmus mibenlétét igazából még nem is értjük. Az idők folyamán — itt évmilliókban is gondolkodhatunk — a Föld felszínének átlagos hőmérséklete is közel állandó, habár a Nap egyre fényesebben süt. Ha emelkedik a bolygó hőmérséklete, elszaporodnak a növények. A fotoszintézishez szükséges szén-dioxidot kivonják a légkörből. Ezzel a légkör nyújtotta üvegházhatás gyengül, a Föld több hőt képes kisugározni. Ha csökken a hőmérséklet, a növényzet pusztulása megnöveli a levegőbe jutó szén-dioxid mennyiséget, erősebb lesz az üvegházhatás, a hőmérséklet emelkedik.

A bioszféra folyamatait, akárcsak az élőlény életműködését, körfolyamatokként ragadhatjuk meg. Gondoljunk például a víz, a szén, a nitrogén körforgására a természetben.

Sorolhatnánk sok egyéb körfolyamatot is; hosszabb, rövidebb időtartamok jellemzik az egyes ciklusok időbeni lefolyását. Ezek a körfolyamatok egymásba is kapcsolódhatnak, kapcsolódnak. A körfolyamatok összjátéka biztosítja a bioszféra életképességét, állandóságát. Ha a bioszféra valamely eleme sérül, ez még nem jelenti az egyensúly végleges elvesztését. Működésbe jönnek a visszacsatoló, helyreállító folyamatok, és a bioszféra megváltozva ugyan, de fennmarad.

A bioszféra és az élő szervezet közötti hasonlóság alapja végül is az, hogy mind a bioszféra, mind az élőlény önszerveződő rendszert alkotnak. A bennük közös elemek, az alkotórészek egymással való szoros kapcsolata, a körfolyamatok, a körfolyamatok feltételeit biztosító állandó mennyiségek beszabályozottsága, mind az önszerveződő rendszerek általános jellemzői.

A civilizáció és a természetes környezet

Természettudományos fogalmakkal tárgyalva: a civilizáció igen sokféle mintázattal rendelkező, közel egyensúlyi rendszer, amelyet körfolyamatok összjátéka tart fent. Egy civilizáció önszerveződő rendszerként alakulhat ki és aszerint maradhat fent. A civilizáció környezete, feltéve, hogy más civilizációkkal nincs kapcsolatban, a természetes környezet.

A továbbiakban azzal foglalkozunk, hogy a civilizáció miként hat a természetes környezetre. A kapcsolatrendszert aszerint érdemes vizsgálni, hogy

mennyire összetett a civilizáció rendszere. Az emberi történelem jellemzője, mint azt már említettük, hogy az idő múlásával az emberek egyre összetettebb rendszerekbe szerveződnek, egyre kifinomultabb módon elégítik ki különböző szükségleteiket. Például a gyűjtögető, halász-vadász életmódról a letelepedett földművelő életre való áttérés nyilvánvaló lépés az egyszerűbből az összetettebb felé. A letelepedett életmód könnyebbé teszi a különböző mesterségek — fazekasság, az építőmesterségek stb. — megjelenését.

Az összetettség mérhető, mérésének két módja is lehet ([4]). Az első eljárás az emberek által játszott szerepeket veszi számba. Míg a gyűjtögető, halász-vadász közösségekben csupán néhány tucatnyi tevékenységről beszélhetünk, addig a mai világban a lehetséges tevékenységek száma milliónyi. Európában a népszámlálások csak foglalkozásként, hivatásként tíz-, húszezernyi tartanak számon. Az összetettséget mérő másik eljárás a napi használatban előforduló tárgyak számát vizsgálja. Vessük össze, hogy egy indiai faluban mit árulnak a boltban: sót, cukrot, rizst, gyufát és még néhány apróságot. Hasonlítsuk ezt össze egy nagy mai magyar bevásárlóközpont sokezeres áru kínálatával.

Az összetettebbé váló társadalom egyre erősebben rászorul arra, hogy minél több energiát, nyersanyagot vegyen fel a környezetéből.

Nyersanyagforrások

Nyersanyagról mint a természetben meglévő, felhasználható anyagmenyiségről beszélünk. Például a madár számára ilyen nyersanyag a fészeképítéshez szükséges gízgáz. Az emberi lakóhely elkészítéséhez felhasználható nyersanyag lehet a terméskő, az agyag és így tovább.

Ahhoz, hogy valami nyersanyagforrássá lehessen, el kell tudnunk választani a hordozóközegétől. A vasérc nyersanyag, de a talaj nem az, pedig az is tartalmaz vasat. Hasonlóan a tölgyfa törzse faipari nyersanyag, de a tölgyfa gallyai már nem azok.

Amikor a nyersanyagokat felhasználjuk, szétszórjuk őket. Tárgyaltuk, hogy mivé lesz a banán, ha a majom megeszi. Amikor a terméskövet kibányásszák és felhasználják, az eredetileg egy helyen lévő kő szétaprózódik és területileg szétszóródik. Amikor a szén mint energiaforrást az erőműben elégetjük, az elégett szénből némi salak marad vissza, és a felszabadult hőenergia egy része a helyszínen oszlik szét, többi része a villamosenergia-hálózatba jutva kerül el mindenfelé.

Van ami többféle tevékenység nyersanyaga is lehet. Például a fát nemcsak az asztalos használhatja fel, hanem tüzelőnek is jó. A kőolajból üzemanyag és műanyag is készíthető. Semmi sem nyersanyag, amíg nincs mire használni.

A nyersanyag felhasználásához mindig kell valamennyi energia. Idővel, az energiafogyasztás növekedésével együtt, az ember egyre több anyagról fedezte fel, hogy az számára felhasználható nyersanyagforrást képez.

Az ember és környezete

Ha számba vesszük, mire van szüksége az embernek a környezetből, a kulcsszó az energia. Az élő szervezet mint önszerveződő rendszer, a környezetéből felvett energia felhasználására épül. A növényi lét alapja a napenergiát szerves anyaggá átalakító fotoszintézis.

Az állatok a növények vagy más állatok elfogyasztásával jutnak energiához. Az állatvilágban a törzsfajlódási folyamat során azok a fajok kerülnek kedvezőbb helyzetbe, amelyek könnyebben szerezték meg, ragadták el más élőlényektől az életműködéseikhez szükséges energiát. A mozgás, bár energiába kerül, megkönnyítette a táplálék keresését. A hidegvérű halakat és a kételtűeket a melegvérű állatok követték. Igaz, ez is energiába kerül, de így az állat alacsonyabb hőmérsékleteken is tevékeny maradhat, járhat táplálék után. Az élet fejlődése során az egyre több energiát felhasználó újabb fajok egyre nagyobb energiasűrűségű táplálékokat fogyasztanak.

A természet legtöbb energiát fogyasztó lényé az ember. Megkülönböztető szerve, a nagyagy, a tömegéhez képest igen sok energiát fogyaszt, viszont működésének köszönhetően az ember nagyon sokféle energiaforráshoz hozzáférhet. Míg az állat csak olyan viszonyok között képes megélni, amelyet genetikai adottságai megszabnak számára, az ember bármilyen más élőlény-nél jobban tud a környezetéhez alkalmazkodni, és a Földön szinte mindenütt megélhet.

Az ember társas lény, így csak a közösségben élő ember maradhatott fent és lehetett sikeres. Az ember meghatározó tulajdonságai az értelem, a beszéd, a tanulás és a tanítás. Ezek miatt az ember természetes környezetéhez viszonya minőségileg más, mint az állatoké. Bár az ember genetikai adottságai változatlanok, eszközöket készítve alkalmazkodni tud változó vagy új környezetéhez. Például a hatékony vadászathoz hosszú és éles fogak szükségesek. Kivételes képességű emberek képesek voltak arra, hogy új eszközöket, nyilat, lándzsát fedezzenek fel, és ezekkel vadásszanak. A nyíl vagy a lándzsa készítését a többiek eltanulják tőlük, és ezt a tudást továbbadják.

Az emberen kívül az élőlények csak annyi energiát vesznek fel a környezetükből, amennyi testük anyagcseréjéhez szükséges. Az ember a táplálékával annyi energiát vesz fel, mint egy állandóan égő 120 wattos izzólámpa. Ez az az energiamennyiség, amennyi egy mintegy 70 kilogramm tömegű, vegyes táplálkozású biológiai lény életműködéséhez szükséges.

Az ember viszont nem csak annyi energiát fogyaszt, amennyit mint biológiai lénynek a táplálkozásával fel kell vennie. Nevezük ezt testen belüli

energiának. Az ember a testen belüli energiánál jóval többet képes felhasználni.

Ezeket nem teste anyagcseréjén keresztül veszi fel, hanem más, mondhatni testen kívüli módon. Testen kívüli energiát használ fel, amikor tüzel. A tüzet az ember kezdetben csak az ételei elkészítéséhez vagy a hideg és a vadállatok elleni védekezésért használta, később sok más egyéb célra is. A szélenergia vagy a víz energiájának alkalmazása, malmok vagy más gépezetek hajtására, szintén testen kívüli energiafelhasználás. A fosszilis eredetű tüzelőanyagok, a szén, a gáz és a kőolaj energiájának felhasználásával az ember egy időre óriási energiamennyiségek felett rendelkezik.

Az embernek a természetes környezetéből a táplálékon és az energiákat hordozókon kívül más anyagokra is szüksége van. Magától értetődő emberi szükséglet a tiszta levegő és a víz. A tiszta levegő léte korábban nyilvánvalónak látszott, ma már sajnos nem az. A víz nemcsak az ember folyadékszükségletének fedezéséhez kell, hanem a táplálékul szolgáló növényi és állati lét feltétele is. Továbbá az ember csak olyan helyen élhet meg, ahol az éghajlat megfelelő, kedvező számára. Az ember eszközei segítségével azonban lakályossá teheti a környezetét.

A testen kívüli energiáktól a fosszilis energiáig

Az ember egyik legfontosabb felfedezése, a testen kívüli energiák fő forrása, a tűz. A sült, főzt étel sokkal könnyebben fogyasztható, táplálóbb. A tűz meleget is ad, így hidegebb éghajlatú övezetekben is megélhet az ember. De a tűznek számtalan más felhasználási lehetősége is van: fatuskóba lyukat lehet vele égetni, ki lehet vele füstölni a méheket, téglát, kerámiát lehet vele égetni, fém olvasztható vele. A felégetett erdőterületen földet lehet művelni.

A tüzelőt évszázadokon keresztül az elpusztult élőlények testének szövetei, elsősorban a száraz fa szolgáltatta. A fátlan területek tüzelőanyaga az állatok megszáradt ganéja. A faszén alkalmazása megnövelte a tüzelőanyag energiasűrűségét, és a fémkohászat nélkülözhetetlen alapanyagául szolgált.

A gyűjtögető, halász-vadász életmódot követő népcsoportok testen kívüli energiafelhasználása a tűzre szorítkozik. Az — egészen a közelmúltig — ilyen életmódot követő népeket, mint az ausztráliai bennszülötteket és a Kalahári-sivatagban élő kungokat tanulmányozva el lehet képzelni, milyen lehetett valamikor az emberiség élete. Ezek a csoportok csupán pár napra való élelmiszerrel rendelkeznek. Állandó lakhelyük nincs, az egyes gyümölcsökért és egyéb növényi táplálékokért sokszor tíz kilométernél is többet gyalognak. Az emberek holmija elfér egy bőrzsákban. A szerszámok és

egyéb használati tárgyak könnyen elkészíthetők, nem képviselnek komolyabb értéket. Közösen vadásznak, a zsákmányt bonyolultabb elosztási rendszer szerint, de mindenkinek juttatva terítik szét.

Az állatok háziásítása sokféleképpen használható energiaforrást jelentett. Egyrészt a háziállatok mint táplálékok élő élelmiszertartalékkul szolgálnak. Az állatokat tartó csoport ezért olyan helyeken is megélhet, ahol egyes időszakokban nem lehet elegendő táplálékot találni. Továbbá bizonyos állatok szállítóeszközökként, teherhordóként vagy házasállatként is hasznosíthatók. Az állattartásra berendezkedett nomád társadalmak mozgékony, igen jól szervezett alakulatok, amelyek fejlett technikákkal, kiváló fegyverzettel rendelkeznek. A letelepedett földművelő társadalmak a háziállatokon kívül a növényi magvakban is tárolnak élelmiszert, amelyek segítségével hosszabb teleket is túl tudnak élni. A földművelés energiagazdálkodása az igásállatok alkalmazására épül. Velük szántanak, ezek húzzák a terményeket szállító kocsikat, esetleg hajtják a magvakat őrlő malmokat.

A szélerergia elsősorban a vízi szállítás, a hajózás energiaforrása. Más gépezetek — malmok, öntözőrendszerek — energiaforrásául csak később kezdtek felhasználni.

Az ókor nagy birodalmainak hatalmas és néhány esetben máig fennmaradt építményeinek és egyéb műszaki alkotásainak testen kívüli energiaforrásai a fa, az állati energia és a szélerergia. Mezopotámia, Egyiptom, India, Kína, Görögország, Róma és az amerikai birodalmak ezekre a ma igencsak szegényesnek ható energiahordozókra épültek.

Az ókor nagy birodalmainál északabbra lévő európai területeken a hosszabb kemény telek erősebben próbára tették az embert. Szükség volt minél jobb szerszámokra és gépekre. A szerszám és a gép közötti különbség nem egyértelmű.

Általában azonban a gépek hajtása több erőforrást igényel, a szerszámot az emberi erő működteti. Gépek léteztek korábban is, de az ókorban elég volt az, amit emberi és állati erővel el lehetett végezni. A középkori kolostorokban viszont nem volt elég munkaerő. A világtól a vadonba elvonult szerzetesek önmagukat látták el a szükséges javakkal, de a tanuláshoz, szertartásokhoz, elmélyüléshez sok idő kellett. Nem alkalmazhattak külső munkaerőt, mert a nyitottság zavarta volna a szerzetesi életet. A megoldás a minél több gép használata volt, ezért a vízerő tömeges alkalmazása elsősorban a kolostorokhoz kötődött. Másrészt az anyagias gondolkodás egyre nagyobb teret hódított. A nemesek úgy tehettek szert nagyobb jövedelemre, ha a birtokaikon több malom üzemelt.

A szélerergia és vízenergia malmok, szivattyúk és egyéb gépezetek hajtására való alkalmazása a középkor Európájában vált mindennapossá. Az

ipari forradalom előtti társadalmakban a testen kívüli és testen belüli energiák aránya 4 : 1 körül volt.

Európa sokat szenvedett a különböző nagy járványoktól, ami a lakosság számának erősebb ingadozásával járt. Amikor a nagyobb járványok után a népesség szaporodni kezdett, hamarosan éhezés és tüzelőanyag-, energiahiány fenyegetett. Ezeket az energiaválságokat a fosszilis tüzelőanyagokra való áttérés szüntette meg.

A fosszilis energiák használatának megjelenése

Angliában a XVII. században a lakosság lélekszáma gyorsan növekedett, és a fa annyira hiánycikké vált, hogy áttértek a széntüzelésre. Korábban a fekete kövek a felszínen heverték. Miután egyre többen kezdtek velük tüzelni, előbb csak ásni kellett őket, majd hamarosan vágatokat kellett nyitni, hogy a szénhez hozzáférhessenek. A bányákban hamarosan elérték a talajvíz szintjét. A szén fejtéséhez ezek után állandóan ki kellett emelni a vizet. Az első vízkiemelő rendszereket vödörök láncolata alkotta, ezeket lovakkal, vagy ha lehetett, vízkerékkel hajtották. Amikor már mélyebbről kellett kiemelni a vizet, hosszabb láncolatok, több ló kellett.

Bizonyos mélység után a bányatulajdonosoknak másféle módszert kellett találni a víz felhozására. Az első gőzgépeket éppen arra találták ki, hogy a szénbányákból kiszivattyúzzák a vizet. Ezek után nem volt megállás, a társadalom egyre jobban szénfüggővé vált. A gőzgépeket azután nemcsak szivattyúzásra, de másra is alkalmazták. Ott is lehetett gépeket hajtani vele, ahol nem volt vízi erő. Megszületett a vasút, a gőzmalom és társaik. Megindult az ipari forradalom.

A gépek alkalmazása társadalmi gondná vált. A nagyobb számú, termelékenyebb gépek miatt egyre több ember maradt megélhetés nélkül. A másokról való gondoskodás eszméje viszont egyre gyengült. A piacgazdaság elvi alapja Adam Smith munkájára épül, miszerint a piac úgymond láthatatlan keze az emberi gyarlóságot, mint az irígység, kapzsiság stb. a közjó javára rendezi. Míg korábban szegényen volt a szegényeket és védteleneket megrövidíteni, kizsákmányolni, ezek után eltűntek az aggályok, a piac láthatatlan kezére hivatkozó közgondolkodásban a vallásos és az erkölcsi szempontok jelentéktelenné váltak.

A gépekkel gyártott harisnyák, ruházati cikkek stb. rosszabb minőségűek voltak, mint a hagyományos módon készültek. A munkájukat veszített, gépeket romboló, ellenük tiltakozó mozgalmakat az angol kormány erőszakkal fojtotta el.

A gépi termelés olcsóbb, mert a tulajdonosok kevesebbet fizetnek a gépek mellett dolgozó, nem annyira képzett munkaerőnek. Így a tulajdonosok

gazdagodnak, mások pedig szegényednek. Nem tudnak annyit vásárolni, a megnövekedett termékmennyiséget nincs aki megvegye. Az egyedüli megoldás az export: minél több terméket szállítani külföldre. Ehhez egyre több szállítóeszköz, több erőforrás kell. A gépesített termelés igen súlyos válságokhoz, fenntarthatatlan társadalmi viszonyokhoz vezetett. A verseny arra kényszerít, hogy növeljék a gépesítés szintjét, vagy a termelést olyan országba telepítsék, ahol még olcsó a munkaerő. A mindenütt fellépő tömeges munkanélküliség, a piaci verseny és az erőforrásokért való küzdelem háborúkba torkollott. Ez vezetett az első világháború kitöréséhez is.

A gépi termelés okozta válságok másik oka az, hogy az erőforrás egyre drágább. Minél mélyebb a szénbánya, annál több erőforrást, szénket kell fordítani arra, hogy szénket termelhessenek. Hasonló a helyzet a többi fosszilis erőforrással, az olajjal és a gázzal is. A kitermelésükhöz szükséges erőforrások mennyisége egy idő után annyira megnő, hogy eléri a kibányászott erőforrás mennyiségét. Ha ezt a határt elértük, akkor már nincs értelme folytatni a kitermelést.

A fosszilis energiahordozók alkalmazása az ipari és mezőgazdasági termelés gyorsuló növekedéséhez vezetett.

Az iparosított mezőgazdaság

1950—1980 között a világ mezőgazdasága ugrásszerű átalakuláson ment át. A zöld forradalomnak nevezett folyamat a mezőgazdaság iparosításának felel meg. Hibrid vetőmagokkal, új növényfajtákkal, rendszeres öntözéssel, gépesített talajműveléssel, műtrágyázással, vegyszeres növényvédelemmel a világ gabonatermelése kb. a három és félszeresére nőtt. Például Kína gabonatermelése 1955 és 1995 között a négyszeresére emelkedett. Így az ember rendelkezésére álló élelmiszer mennyisége ugrásszerűen megnőtt, és ennek megfelelően az emberiség lélekszáma az elmúlt negyven év alatt megkétszereződött.

A többszörösére nőtt termelés a mezőgazdasági termelésbe bevitt rengeteg külső energia eredménye. A mezőgazdasági termelésben felhasznált energiák a hagyományos mezőgazdasághoz képest az ötvenszeresére, egyes esetekben a százszorosára nőttek. Találó a mondás, miszerint a mai mezőgazdaság a termőföldet arra használja fel, hogy az olajat és a földgázt élelmiszerré alakítsa át.

Az Egyesült Államokra vonatkozó adatok szerint a felhasznált energia megoszlása a következő. A legnagyobb tétel, 31% megy el a műtrágyagyártásra. 19%-nyi energia a mezőgazdasági gépekre, 16% a szállításra, 13% az öntözésre, 8% az állattenyésztő telepekre — ebben nincs benne a takarmány — 5% a vegyszeres növényvédelemre, 5% terményszárításra, 8% egyéb.

Mindez nem tartalmazza a csomagolás, hűtés, a kereskedelmi szállítások és a háztartási feldolgozás költségeit ([5]).

Az iparosított mezőgazdálkodás, a zöld forradalom mára elérte a határait. Az alkalmazott módszerek egyre jobban szegényítik a talajt, és rontják a termelés feltételeit. Ezért a befektetett erőforrásokat növelni kell, egyre újabb növényvédőszer, több műtrágya szükséges, de ezzel a termelés már nem nő. Újabb lehetőségnek a genetikusan módosított fajták bevezetése tűnik, de ezzel, minthogy a megfelelő tudományos háttér még nem ismert, nem látható, hogy mekkora kockázatokat vállalunk.

A fosszilis energiák mai használata

A napenergia megújuló energiaforrás, csak a földre érő napsugárzás mértéke a korlát. A fosszilis tüzelőanyagok, az olaj, a gáz, a szén olyan mértékben használhatók, ahogy nekünk jólesik, de csak addig, amíg van belőlük. Az emberi időmértéket tekintve a fosszilis erőforrások nem megújulóak. Egy év alatt annyi kőolajat használunk el, amennyi a tudásunk szerint a természetes folyamatokban egymillió év alatt képződik.

Ma az Egyesült Államokban az 1 kcal élelmiszerbeni energia előállításához kb. ugyanekkora fűtőértékű olajat vagy gázt kell a termelésben felhasználni. Ha még az élelmiszeriparra, a kereskedelemre, a vásárlásra fordított energiát is tekintetbe vesszük, akkor 1 kcal-nyi élelmiszer 10 kcal-nyi energiabefektetéssel kerül az asztalra. Másra is használnak energiát, az USA-ban testen kívüli és testen belüli energia aránya 90 : 1. Magyarországon ez az arány 30 : 1. Mindezt a fosszilis erőforrások teszik lehetővé.

Amint a fosszilis energiákat már nem használhatjuk tetszésünk szerint, akkor a világ megnövekedett lakosságát nem tudjuk ellátni élelmiszerrel.

A mai mezőgazdaság kevesebb energiával nem működik. Az Észak-Koreában pusztító borzalmas éhínség jól példázza ezt ([6]). Az ország nagyüzemi mezőgazdaságát a szovjet és kínai támogatás éllette. A két nagyhatalom kedvezményes szállításokkal igyekezett megtartani Észak-Koreára gyakorolt befolyását. A Szovjetunió olcsó olajat, Kína földgázt és műtrágyát szállított. A Szovjetunió szétesése után a szovjet—kínai versengés megszűnt. Oroszország nem adott több olajat, és a kínai kormányzat a versenytárs megszűnését tapasztalva már csak dollárért volt hajlandó földgázt és műtrágyát szállítani. Észak-Korea nem tudott fizetni, és ezek után az energia-rendszere és a mezőgazdasága is összeomlott. 1998-ra a nagyüzemi gépezet 80%-a üzemképtelenné vált. Az ország ekkor a szükséges műtrágyának csak 18%-át tudta előállítani, és így a termésátlagok az évtizeddel korábbiak a 40%-ára estek vissza. Az eredetileg 23 millió lakos közül 1999-re már 3 millió ember halt éhen, és jelenleg 7-8 millióan állhatnak az éhhalál határán.

Ha így folytatódik, a pusztító éhinség addig tart, amíg a lakosok száma a hagyományos mezőgazdasági termeléssel eltartható értékre nem csökken.

A civilizáció hatása a természetes környezetre

Eddig azt tárgyaltuk, mire van az embernek, a civilizációnak szüksége, miket vesz fel a természetes környezetéből. Az energiafogyasztás növekedésével az ember egyre többféle és egyre nagyobb mennyiségű nyersanyagot használ fel a természetből. Egyre több élelmiszert termelhet, ami azt eredményezte, hogy az emberiség létszáma exponenciális függvény szerint nő. Ezzel a környezet igénybevétele méginkább növekszik. Most tekintsük át, hogy mit jelent ez a megnövekedett igénybevétel, hogyan változik a természetes környezet a növekvő nyersanyagfelhasználás hatására.

Az élővilág változatosságának csökkenése

Mivel a fa a régebbi civilizációk fő energiaforrása volt, a nagy birodalmak nagyon sok területen letarolták erdőiket. Például Európában igen gyakoriak a csupasz mészkőből álló hegységek. Nincs rajtuk talaj, csak a fehér sziklák látszanak. Nem mindig volt ez így. Valaha ezeket a hegységeket erdők borították. Az erdőket valamiért kivágták.

Kellett a fa hajóépítéshez, építkezésekhez, vagy akár tüzelni. Az erdők elpusztítása után a területet egy ideig még be lehetett vetni. Amint a föld kimerült, csak a fűvek, gyomok éltek meg rajta. Akkor kezdődött a legeltetés. Ha ezt mérsékelten végzik, azaz csak annyi tehenet, juhot hajtanak a legelőre, amennyit az elbír, a legeltetést lehet folytatni. De a népesség növekedése miatt több állatot hajtottak a rétekre. Ezek annyira lelegelték azt, hogy a terület alkalmatlanná vált tehenek vagy juhok tartására. Maradt ezek után a kecske, amely tövig tudja rágni a növényeket. A kecske ezért a szegény emberek állata.

A kecske után viszont már nem hajt ki semmi. Nem marad meg a gyökérzet, ami a termőföldet a hegyoldalakon tarthatná, az eső lemossa a hegyoldalakat borító talajrétegeket. Megjelennek a fehér sziklák.

A huszadik század elejéig valamennyi táplálék végsősoron a napenergiát átalakító fotoszintézisből származott. Akár a növényt, akár a növényt fogyasztó állatot ette meg az ember, a táplálék energiatartamának a forrása a napfény. A napfény bármilyen bőségben is árad ránk, az élővilág bizonyos korlátos mennyiségű energiát kap belőle. Ez határt szab az élőlények számára. Így a rendelkezésre álló táplálékért állandó küzdelem folyik, kinek juthat több belőle. Az ember úgy juthatott több táplálékhoz, hogyha felszántotta a réteket, felégette az erdőket, hogy termőföldhöz juthasson. Az

emberiség létszáma csak úgy növekedhetett, hogy más fajokat egyre jobban kiszorított a táplálékért folyó versenyben.

Számos háborút folytattak a legelőkért, termőföldekért. Miután Európában nem tudtak újabb területeket megművelni, megindult a gyarmatosítás. Máig oda jutottunk, hogy bolygónkon szinte nem maradt művelésre alkalmas, ám meg nem művelt terület. Amit nem művelünk, az vagy túl megedek, túl száraz, túl nedves vagy tápanyagban túl szegény. A föld termőképességét a kártevőknek nevezett élőlények irtásával lehetett tovább növelni. Mára a bolygónk egészét tekintve a szárazföldi fotoszintézis által átalakított energia mintegy 40%-át az ember hasznosítja ([5]). Az Egyesült Államokban ez az arány 50%. Ami az óceánok, tengerek élővilágát illeti, az ember 1953 óta ötven év alatt halászhajóival kifogta az éceánok halászható halainak a kilencven százalékát ([6]).

Az emberi élettér kiterjesztése oda vezetett, hogy az egyéb élőknél egyre kevesebb hely és energia jut. Emiatt a fajok tömegesen pusztulnak ki, és ez a pusztulás olyan mértékű, amilyenre a földtörténet során kb. hetven millió évente, a nagy kozmikus katasztrófák okozta tömeges kihaláskor van csak példa. Földünk a gyomok bolygójává válhat, ahol az emberen, háziállatain és termesztett növényein kívül csak a patkányok, egerek és a rovarok, valamint a gyomok maradhatnak fent.

A termőtalaj pusztulása

A zöld forradalom felmérhetetlen pusztítással sújtja a termőtalajt. A növényi maradványok bomlásából és a porló kövekből kb. kétszáz év alatt képződik egy centiméternyi termőtalaj. Mivel a növények takarják, az erózió nem pusztítja.

Ha a talajt művelik, a szélviharok hordják, az esőzések elmosásuk a fedetlenül maradt talajt. Az amerikai prérin — száz évnél több művelés után — a termőtalaj fele már odaveszett. A talaj átlagosan harmincszor gyorsabban pusztul, mint ahogy keletkezik.

Nemcsak a talaj mennyisége fogy, rohamosan romlik a minősége is. A termesztett gabonák nagy mennyiségű tápanyagot vonnak ki a talajból. Ahhoz, hogy a talaj teremjen, egyre több műtrágyára van szükség. Lassan a talaj szinte szivacsaként szívja magába a szénhidrogének felhasználásával készült műtrágyákat.

A műtrágya felhasználásának hatását, méreteit jól jellemzik a nitrogén alkalmazására vonatkozó adatok. A természetes biológiai folyamatokban a levegőből évente 130 millió tonna nitrogéngáz alakul át ammóniává, nitráttá. Ez a természetes nitrogén-körforgalom része. A műtrágyagyártás során és egyéb módokon az ember is nagyjából ugyanennyit von ki a levegő nitro-

génjéből. Sajnos a nitrogénműtrágya csaknem kétharmad része a talajvízbe és a felszíni vizekbe kerül, és azokat szennyezi.

A műtrágyák kedvezőtlenül befolyásolják a talaj vegyi és biológiai rendszereit. Savasítják a talajt, csökkentik a felvehető tápanyagok mennyiségét és hozzáférhetőségét. Azok a talajok, amelyeket hosszabb időn keresztül rendszeresen műtrágyáztak, a korábbi természetes szén- és nitrogéntartalmuk felét, kétharmadát elvesztik. A természetes állapot visszanyeréséhez akár kétszáz esztendő érintetlen állapot, vagy 40-50 éven keresztül tartó szerves trágyázás szükséges. Ezért ha a műtrágyázást csökkentjük, a termés hozamok nagymértékben csökkennek, azért is, mert már a talaj minősége sem a régi.

Zavarok az elemek körforgásában

Ahogy az előző részben olvasható, a természetes nitrogén-körforgalom megzavarása igen komoly mértékű. Az emberi civilizáció a kálium és a foszfor körforgalmát még súlyosabban megzavarta. Ezek az elemek a sejtműködés és a fehérjeképződés nélkülözhetetlen nyersanyagai, ezért körforgalmuk megzavarása beláthatatlan következményekkel járhat.

Mielőtt az ember kényelmes lakásait vízőblítéses vécékkel látta volna el, a foszfor és a kálium körforgalma természetes módon zajlott. Ma viszont az emberi anyagcsereforgalomba belekerült foszfor és kálium a csatornarendszeren keresztül a folyóvizekbe, végsősoron az óceánokba jut. Hasonlóan a vizekbe kerülhet a nagyüzemi állattartás során keletkezett állati ürülék foszfor- és káliumtartalma is. Vannak ugyan folyamatok, melynek során a tengeri madarak a fészkelőhelyükre térve a szárazföldekre juttatják az óceánokba került elemeket, de ennek mértéke elenyésző lehet.

Tekintve a foszfortartalmú és káliumtartalmú műtrágyák gyártását, a világ készletei mind foszforból, mind káliumból kb. 2050-ig elegendőek. Mivel a világ foszfátkészletének nagyjából a fele Marokkóban, a káliumkészlet fele pedig Kanadában van, a világ egyéb országai az energiahiány miatt várható szállítási nehézségek miatt már húsz-harminc éven belül nehezen fognak hozzájutni a megfelelő műtrágyákhoz.

Felmelegedés, ózonlyuk

A fosszilis erőforrások eltüzelése miatt rohamosan nő a légkör széndioxid-tartalma és emiatt erősödik az üvegházhatás. Manapság a felmelegedés tényét már nem vitatják, csupán arról folynak még az eszmecserek, hogy vajon mennyire játszott közre az ember a felmelegedésben.

Az ember által a légkörbe juttatott freon megzavarta az ózont keltő és pusztító természetes körfolyamatot. A freon ózonpusztító folyamatokat

katalizál, és emiatt elsősorban a sarkvidékek környékén elvékonyodott az ózonréteg. A lejutó káros ultraibolya sugárzás ugrásszerűen megnövelte az élő szervezetek daganatos betegségeinek arányát.

Zavarok a víz körforgásában

A zöld forradalom komoly változásokat idézett elő a vízhasználatban. A kb. ötven éve zajló erőteljes öntözés eredményeként a talajvíz szintje erőteljesen csökken. Az öntözéshez használt édesvízből nincs elég.

Világszerte, így az Egyesült Államokban is az öntözés mértéke miatt a vízáradó rétegekben lévő víz mennyisége erősen csökken, és emiatt egyre mélyebb kutakat kell fúrni. Az USA nyolc állama, köztük Kansas, Oklahoma, Texas alatti hatalmas föld alatti víztartó rétegben a hatvan éve tartó fokozottabb öntözés miatt a vízszint aggasztóan esett. 1991 óta évente átlagosan 90 centiméternyit csökken. A víztartó rétegből kb. tízennégyszer annyi vizet szivattyúznak ki, mint amennyi oda természetes módon bejut, és már elhasználták a vízkészlet felét. Hasonló a helyzet Kínában és Indiában is. A kutakat egyre mélyebbre kell fúrni, és így az öntözés mind drágább, és ami a lesújtóbb, ilyen mértékben már csak rövid ideig folytatható. Bolygónk négy hatalmas folyója — a Nílus, a Gangesz, a Sárga-folyó és a Colorado — a vizük elhasználása miatt általában már el sem éri a torkolatvidéket, előtte kiszárad. A XXI. század háborúinak jelentősebb része a vízért folyhat majd.

A víz körforgásában jelentkező másik súlyos zavar az üvegházhatás miatt bekövetkező felmelegedés következménye lehet. Az óceáni vízáramlatok, amelyek kaotikus módon függhetnek a hőmérséklet változásaitól, megváltoztathatják irányukat, vagy akár le is állhatnak. A Golf-áram az Észak-sark felmelegedése, a jég olvadása miatt akár le is állhat, ami felmérhetetlen módon megváltoztathatja az Atlanti térség országainak időjárását, és hat majd Közép-Európára is.

Civilizációnk fenntarthatóságáról

Ahogy fentebb tárgyaltuk, a mai civilizáció a környezetét érezhetően megváltoztatta. Elsősorban a fosszilis erőforrások erőteljes felhasználásával durván megzavart számos alapvetően fontos természetes körfolyamatot. Emiatt a jelenlegi alakjában ismert fogyasztói életmód akkor is fenntarthatatlan lenne, ha a fosszilis erőforrások korlátlan mennyiségben és ideig rendelkezésünkre állnának. De ez nincs így, máris érezhetőek válságjelek, amelyek pár éven belül nyilvánvalóvá tehetik az egyébként végletesen pazarló fogyasztói viselkedés tarthatatlanságát. A kirobbanó energiaválság egyben a fentebb tárgyalt környezeti terheléseket is komolyan csökkenti majd.

Minél jobban felkészülünk a várható hatalmas megrázkódtatásokra, annál jobban csökkenthetjük a vele járó emberi szenvedést, és elősegíthetjük az új, fenntartható életmód kialakítását.

Arról, hogy az egyes fejlett országokban milyenek a kilátások a fenntartható civilizációba való átmenetre, nem sokat tudunk. Az Európai Unió egyre inkább meghatározó fontosságúnak tartja a kérdést. Az EU-nak a bővítések sikere és a központosított döntéshozatali rendszer megfelelő működtetése esetén jó esélyei vannak arra, hogy nagyobb zökkenőkkel ugyan, de létrehozhatja fenntartható rendszerét. Az USA helyzetéről lásd az [5] munkát, Japán kilátásait a [7] tanulmány elemzi. Ez utóbbi egyben részletesen tárgyalja a fenntarthatóságot érintő valamennyi gazdasági tényezőt nemcsak Japánra, hanem a világ egészére is.

Irodalom

- [1] PAUL DAVIES: The Cosmic Blueprint. Simon & Schuster, 1988.
- [2] F. JOHN ODLING-SMEE, KEVIN N. LALAND, MARCUS W. FELDMAN: Niche Construction. Princeton University Press, 2003.
- [3] JARED DIAMOND: A harmadik csimpánz. Typotex, 2002, 323. o. (Magyarul a Szent Máté-szigeten történekről.)
- [4] RICHARD DOUTHWHITE, Irish Times, 2001. december 29.
- [5] DALE ALLEN PFEIFFER: Eating fossil fuels. <http://groups.yahoo.com/group/energyresources/message/42751>
- [6] ANTONY F. F. BOYS: North Korean Food Crisis. <http://www9.ocn.ne.jp/%Easlan/dprke.pdf>
- [7] ANTONY F. F. BOYS: Food and Energy in Japan. <http://www9.ocn.ne.jp/%Easlan/21fee.pdf>

A mikrorobbantásos fúzió, avagy a jövő egy lehetséges új energiaforrása

Rácz Ervin

MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet, Plazmafizikai Főosztály

Abstract. Micro-explosive fusion as a potential energy source of the future. Energy is a key problem of the future. An energy conversion that has unlimited resources and environmentally sound can be the base of the future energy systems. Nuclear fusion fulfils all these demands. In this paper laser-physical bases that are necessary to understand plasma-physical and micro-explosive fusion are summarized. The new laser-fusion equipment and a new principle: the inertial confinement fusion, the direct- and the indirect-pumping, micro-explosive fusion are also reported. Finally, the author gives a short review about the Hungarian participation in the investigation of laser-plasma and also his own work within this project.

Bevezetés

Manapság szinte már minden háztartás nélkülözhetetlen tartozéka a rádió, a televízió, a videó, a különböző szórakoztatóelektronikai eszközök, a hűtőgép, a mosógép és még megannyi elektromos eszköz. Egyre több családnak van már számítógépe is. A jövőben talán pl. a házimozirendszerek és egyéb, ma még ismeretlen elektromos eszközök elterjedésével is számolhatunk. Természetesen még hosszasan sorolhatnám a háztartásokban megjelenő elektromos berendezéseket. Az iparban is egyre jobban teret hódítanak a különböző elektromos berendezések. Az ilyen eszközök elterjedése maga után vonja az elektromos energia felhasználásának növekvő igényét.

Földünk energiaigényét a különböző energiahordozókból nyerhető energia fedezi. Ma Földünk energiaigényének kb. 70%-át fosszilis tüzelőanyagokból nyerjük. Idetartozik a szén, a kőolaj és a földgáz. Amerikai becslések szerint szénből úgy 200 évre, kőolajból 30-40 évre, míg földgázból 60-70 évre elegendő tartalékaink vannak. Azonban a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása egyrészt környezetvédelmi okokból (üvegházhatást növelő gázok kibocsátása), másrészt pedig a készletek kimerülése miatt már akár rövidebb, de ha nem, akkor hosszabb távon elkerülhetetlenül csökkenni fog. Rendkívül környezetszennyező mivoltuk miatt egyes környezetvédő szervezetek

már manapság is keményen felemelik hangjukat a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével nyert energia ellen.

Egy másik nagy energiatermelési módszer a nukleáris hasadóanyagok hasadása során, az atommagok átalakításából nyert energia. Ma a világ energiaszükségletének kb. 7%-át fedezik nukleáris energiával. Egyes becslések szerint a földi uránkészletek legfeljebb 100 évre elegendőek. Tudjuk, hogy a szigorú biztonsági rendszabályok betartása mellett az atomenergia-termelés viszonylag olcsó és környezetbarát. Azonban a nukleáris erőművekben keletkező erősen radioaktív anyagokat a hosszú felezési idejük miatt több száz évig biztonságosan kell tárolni, ill. olyan technológiákat kell kidolgozni, amelyekkel ezek az erősen sugárzó anyagok gyorsabban lebomló radioaktív anyagokká alakíthatók át (transzmutáció). A radioaktív hulladék elhelyezésének problémáit figyelembe véve, sokak szemében a hasadóanyagokból nyert energia ugyancsak környezetszennyező.

Az emberiség számára ma rendelkezésre álló energiaforrások közül a harmadik nagy csoportba az ún. megújuló energiaforrások tartoznak. Ezek tulajdonképpen nem mások, mint a napsugárzás eredményeképpen vagy azzal összefüggésben állandóan újratermelődő forrásaink. Ide sorolhatók a nap-, a szél-, a vízenergia, a biomassa, és más talán ritkábban előforduló forrás is, mint pl. a geotermikus energia, az árapályenergia és a tenger hullámzását felhasználó hullámenergia is. Azonban ezek a megújuló energiaforrások nem termelnek annyi energiát, amely elegendő lenne Földünk állandóan növekvő energiaigényének kielégítésére. Egyes becslések szerint Földünk népességének energiaigénye kb. 2020-ra eléri az 1990-es igény kb. kétszeresét. Energiafelhasználásunk egyébként 1970 és 2002 között közel a duplájára emelkedett, és 2020-ra újabb 60%-kal fog növekedni. E nagymértékű növekményt elsősorban a fejlett országok energiaigényének növekedése, illetve a fejlődő országok népességszámának emelkedése és iparosodásának fejlődése eredményezi.

A fentebb leírtak odavezetnek, hogy mindenképpen szükség van valami olyan új, biztonságos, környezetbarát, nagy mennyiségű energiát viszonylag kis területen előállító, folyamatos energiaellátást biztosító, olcsó és szinte kimeríthetetlen energiaforrásra, mely egy időre megoldhatja az emberiség energiagondjait. Úgy tűnik ma, hogy ilyen ideálisnak tekinthető energiaforrás egyike a magfúzió lehet.

A magfúzió során két könnyű, kis tömegű atommag egyesülése során felszabaduló energiát használhatnánk fel barátságos célokra, tehát pl. energiatermelésre. A legkézenfekvőbbnek az látszik, hogy a legkönnyebb elem, a hidrogén két izotópját a deutériumot (D) és a tríciumot (T) használjuk fel erre a célra. A deutérium-trícium fúziója során hélium és egy neutron keletkezik. Egy reakció alatt keletkező hélium energiája kb. 3,5 MeV, a neut-

ron energiája pedig 14 MeV körüli.¹ A fúziós reakció bekövetkezéséhez igen magas, a számítások szerint kb. 100 millió °C hőmérsékletű közegre van szükség. Ilyen hőmérsékleten pedig az anyag már egy új halmazállapotban, a *plazmaállapotban* van jelen.

A plazma fogalma

Az átlagos Olvasó talán keveset tudhat a plazmákról, holott a világegyetem több mint 90%-a (egyes becslések szerint több mint 99%-a) plazmaállapotban van. Ha a plazma előfordulási arányát tekintjük, akkor ez a leggyakoribb halmazállapot. Vajon akkor a legfontosabb is? Mi is a plazma tulajdonképpen? A plazmaállapot a szilárd, a folyékony és a gáz állapot mellett a negyedik halmazállapot. De hogyan értelmezhető a plazma fogalma? Járjuk körül ezt egy kicsit.

A plazma olyan töltött és semleges részecskék kvázineutrális gáza, amelyek kollektív viselkedést mutatnak. Tehát a meghatározásból következik, hogy nem minden ionizált gáz plazma. A plazmát az különbözteti meg az egyszerű, ionizált gázoktól, hogy jellemzője a kvázineutralitás és a kollektív viselkedés. Elég nagy távolságból tekintve a töltött és semleges részecskék rendszerét, az globálisan semlegesnek tekinthető. Azaz a megfelelő töltések és koncentrációk szorzatainak a részecskerendszerre tekintett összege zérus.

Természetesen a plazma fogalmát sokkal precízebben és pontosabban is meg tudjuk már határozni, azonban ehhez a plazmafizika elemeibe történő alaposabb betekintésre lenne szükség, ezt ismertetni pedig nem célja írásunknak. Fogadjuk el és használjuk a fenti definíciót.

A világegyetem szinte teljes anyaga plazma. Pl. a csillagok anyaga, a planetáris ködök mind plazmák. De nem kell elhagyni Földünket, hogy plazmákkal találkozhassunk. A teljesség igénye nélkül megemlítünk néhány, a Földünkön is előforduló plazmát: viharban, felhőszakadás idején sokszor előfordul villámás. Maga a villám közege egyik szép példája a földi plazmáknak. Hegesztéskor a hegesztőpálca által húzott ív ugyancsak plazma, de példaként említhetnénk magát a plazmahegesztést is. Alacsony hőmérsékletű plazmákkal találkozhatunk a különböző gázokkal töltött fénycsővekben is. Szinte minden háztartásban megtalálható már a piezoelektromos gázugyújtó. Elektromos kisülés révén ebben az eszközben is plazma keletkezik. A földi sarkkörök közelében néha megfigyelhető fényjelenség, az ún. sarki fény ugyancsak plazma. De még említhetnénk a — talán ma még kevésbé elterjedt — plazmatelevíziót is példaként.

¹ A keletkező energiák a szokásoknak megfelelően megaelektronvoltban (MeV) vannak megadva. $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

A fenti felsorolásból is látszik, hogy bolygónkon sok helyen fordulnak elő plazmák. Ezek a plazmák néhol magas, néhol pedig alacsony hőmérsékletűek, és mindenhol eltérő sűrűségűek, azaz eltérő számú töltött részecskét tartalmaznak köbcentiméterenként. Mindezeket figyelembe véve beszélhetünk híg és sűrű, illetve alacsony és magas hőmérsékletű plazmákról is.

A fúziós reakció feltételei

A korábbiakban volt szó arról, hogy a deutérium-trícium fúziós reakció egyik feltételeként a közeg hőmérsékletét igen magas értéken, úgy 100 millió °C körül kell tartani. Ezen kívül biztosítani kell a magas hőmérsékletű plazma fennmaradását elegendő hosszú ideig. A felszabaduló fúziós energiának pedig meg kell haladnia a plazma felfűtésére és a plazmából távozó sugárzási veszteségek pótlására fordított energiát. Ekkor beszélhetünk csak energiatermelésről. Tehát a fúziós termonukleáris folyamat beindulása a plazma hőmérsékletétől, sűrűségétől és a plazmaállapot élettartamától függ.

Legyen T a deutérium-trícium-plazma hőmérséklete, a gázkomponensek, azaz a deutérium és a trícium részecskeszám-sűrűsége egyformán $n/2$, és t a plazma élettartama, vagy más néven az energiaösszetartási idő. Ez a t paraméter lényegében a plazma energiaszigetelő képességét jellemzi. Ez azt jelenti, hogy amennyiben kikapcsoljuk a plazma fűtését, annak energiája t idő alatt csökken e -ed részére. Időben állandó viszonyok fenntartásához folyamatosan pótolni kell a deutérium-trícium-gázt, és a gáz felfűtéséhez állandóan energiát kell bevinni. Önfenntartó fúziós folyamat eléréséhez a t idő alatt megtermelt fúziós energiának fedeznie kell az ezen idő alatt a rendszerbe bevitt hideg gáz fűtésére és az egyes sugárzási veszteségek pótlására szolgáló energiát. Mindez akkor következik be, ha az ún. *Lawson-kritérium* teljesül. Deutérium-trícium reakcióra és $T = 2$ millió °C-ra a Lawson-kritérium az alábbi:

$$nt > 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}.$$

Ezt a nagy nt szorzatot kétféleképpen lehet létrehozni.

1. Nagy n és kis t értékek mellett a szorzat értéke nagy lehet. Tehát ebben az esetben a deutérium-trícium fúziós plazma sűrűsége nagyon nagy, de az az időtartam, ameddig a plazmát összetartjuk, viszonylag kicsi. Az ilyen nagy sűrűségű plazmákkal létrehozható fúziót *mikrorobbantásos fúzió-nak* nevezzük.

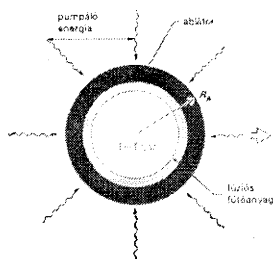
2. Kis n és nagy t értékek mellett is nagy lehet a szorzat értéke. Ebben az esetben a fúziós plazma nem túl sűrű, nevezhetjük talán ritkának, viszont az energiaösszetartási idő (t) elég nagy (az 1. pontbeli értékekhez

képest). Tehát ekkor a kis sűrűségű plazmát viszonylag hosszú ideig együtt kell tartani. Az összetartás módjáról ezt a fajta fúziós elképzelést *mágnese-sen összetartott fúzió*nak is nevezzük.

Jelen írásban a következőkben az 1. pontban említett mikrorobbantásos fúzió néhány érdekes kérdését tárgyaljuk.

Fúzió nagy sűrűségű plazmákban, a mikrorobbantásos fúzió elve

Mint említettük, a fúziós reakció létrehozásának az egyik módja a mikrorobbantásos fúzió. Ebben az esetben egy kis, ún. fúziós kapszulát nyomnak össze magas hőmérsékleten igen nagy sűrűségűre addig, amíg a magas hőmérséklet és a megfelelő ideig előálló nagy sűrűség a Lawson-kritérium értelmében beindítja a termonukleáris fúziót, és egyúttal önfenntartóvá teszi azt. A fúziós kapszula gömbszimmetrikus. Belső része kis sűrűségű ($< 1 \text{ mg/cm}^3$) deutérium-trícium gázkeverékből áll, és ezt veszi körül egy vékony gömbhéjrétegben az ablátornak nevezett tartomány (lásd 1. ábra).



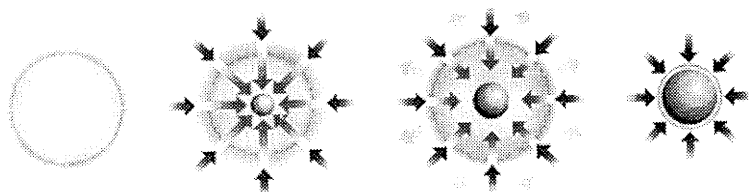
1. ábra

A fúziós kapszula keresztmetszeti sémája
(Az ábrán feltüntettük a külső pumpálónyalábokat is.)

Az elképzelések szerint ezt a kapszulát a megfelelő sűrűségűre úgy nyomnák össze, hogy a külső ablátorréteget a réteg felületére koncentrált nagy energiával sugároznák be. Ezen energia besugárzásának ma a legkézenfekvőbb módszere az, hogy pl. nagyintenzitású lézerek nyalábjával, nyalábjaival vagy valamilyen ionnyalábbal lövik meg az ablátor felszínét. A pumpálólézer vagy ionnyaláb igen rövid idő — néhány nanoszekundum vagy pikoszekundum — alatt energiát közöl az ablátorréteggel, és ezáltal felfűti azt. Az energiaátadás révén az ablátor kifelé kezd tágulni, és eközben a gömbhéj maradék részét befelé löki. Úgy is fogalmazhatunk, hogy amint a koncentrált lézernyaláb eltalálja a kapszula felszínét, ott mikrorobbanás révén anyagot párologtat, (idegen szóval ablál) a kapszula felületéről. A mikrorobbanás során — hasonlóan egy bomba robbanásakor tapasztaltakhoz —

lökéshullám indul ki a robbanás helyéről. E lökéshullám az ablátorhéj egy részét a gömb középpontjától kifelé mutató irányban vezeti el, míg a maradék részét befelé löki (impulzusmegmaradás). Olyan ez, mint egy a lepárolgással, ablációval meghajtott olyan rakéta, amely befelé gyorsul. Ha a pumpálónyalábok iránya éppen a fúziós gömb középpontja felé mutat, akkor ez a rakéta pontosan a gömb középpontja felé gyorsul. A befelé lökött gömbhéj nyomja össze, azaz sűríti és ezáltal melegíti a fúziós fűtőanyagot mindaddig, amíg az a gömb közepe táján eléri a kritikus, szükséges sűrűséget és hőmérsékletet (10-20 keV), tehát beindul a fúziós reakció. A mikrorobbantásos fúzió így a termonukleáris fűtőanyag tehetetlenségét használja fel ahhoz, hogy a szabályozott termonukleáris fúzióhoz szükséges összetartást biztosítsa. Ezért ezt a módszert más néven *tehetetlenségi összetartású fúzió*nak is nevezzük. A központi forró szikrában történő gyújtás csökkenti a szükséges pumpálóintenzitás nagyságát. Ezáltal a felfűtéshez szükséges energiának csak egy kis hányada (kb. tizede) kell, ugyanis a még fúziós feltételeket el nem ért deutérium-trícium közeget már a forró szikrában keletkezett fúziós, 14 MeV energiájú neutronok (lásd korábban) tovább fűtik.

A mikrorobbantás fentebb ismertetett elvét, vagyis azt, amikor a fúziós kapszulát közvetlenül a kapszulára fókuszált lézernyalábokkal robbantják be, *direkt gyorsbegyújtásos lézerfúzió*nak nevezzük. Ez a fúziós begyújtási elv egy kiváló magyar származású fizikus, Teller Ede agyában született meg. Teller így álmolta meg annak idején a hidrogénbomba begyújtását. Teller elvét végül nem a rendkívüli pusztító erővel bíró atomfegyver, hanem a békés energiatermelés egyik módozatában használták fel. A direkt gyorsbegyújtásos lézerfúzió elvét jól mutatja be a 2. ábra.



2. ábra

A direkt gyorsbegyújtásos lézerfúzió elve

A fúziós energiatermelés kritériumaként korábban ismertetett Lawson-kritérium helyett a tehetetlenségi összetartású fúzióra egy másik kritériumot szoktak megadni. Ez pedig a

$$\rho r \approx 3 \text{ g/cm}^2$$

szorzat, ahol ρ az anyagsűrűség,² r pedig a plazma sugara. Itt jegyezzük meg, hogy a kutatók által már korábban elvégzett számítások szerint a forró szikrában a fúzió már a $\rho r \approx 0,3 \text{ g/cm}^2$ -es értéknél is begyullad. A Lawson-kritérium pedig már az égés feltételét írja le.

A számok sűrűjében

Álljunk itt meg egy kicsit és gondoljunk bele mit is jelent ez a $\rho r \approx 3 \text{ g/cm}^2$ értékű szorzat. Egy r sugarú gömb tömege az $m = 4\pi\rho^3r^3/3\rho^2$ módon számítható ki. A tömeg, így a fúzióhoz szükséges össztömeg is tehát $1/\rho^2$ szerint függ a sűrűségtől. A közönséges folyadéksűrűség, $0,21 \text{ g/cm}^3$ esetén több mint $2,5 \text{ kg}$ deutérium-trícium lenne szükséges. Ekkora tömeg fúziós begyújtásához pedig kb. $3 \cdot 10^{14} \text{ J}$ vagy kb. 70 kilotonna hagyományos (pl. TNT) robbanóanyag energiájára lenne szükség. Éppen ezért nagyok a bombák. Ha azonban elképzeljük azt, hogy sikerül egy r sugarú gömb $r/2$ vastagságú héját pl. 400 g/cm^3 -re összepréselni, akkor a $\rho r \approx 3 \text{ g/cm}^2$ feltétel szerint már csak úgy 5 mg tömeg válik szükségessé a fúzióhoz. Ez a tömeg pedig már kis gömbi méretben is előállhat. Azaz a deutérium-trícium fúziós kapszulák kicsik lehetnek, illetve lesznek.

Egy másik elgondolkodtató dolog lehet az, hogy mekkora pumpálóenergia kell ahhoz, hogy előidézzé a direkt gyorsbegyújtásos mikrorobbanthásos fúziót? Azt mondhatjuk, hogy a fúziós követelmények teljesüléséhez úgy $10\text{-}20 \text{ ns}$ ideig tartó megajoule nagyságrendű pumpálóenergia esetén teremthető meg az a feltétel, hogy az ablációs nyomás kb. 100 Mbar lesz, ami elegendő ahhoz, hogy a felgyorsítandó szilárd fűtőanyagot kb. $3\text{-}4 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ sebességre gyorsítsa fel.

Az alapvető kérdés az volt annak idején — miután szimulációkból, számításokból a fenti eredményeket megkapták —, hogy mivel és hogyan pumpálják meg a deutérium-trícium kapszulát? A kérdésre a választ a lézerek gyorsütemű fejlődése adta meg. A XX. század végére a különböző lézerek, lézerrendszerek nagy fejlődésen mentek keresztül, így egyértelművé vált, hogy a fenti nagy energiát csak igen nagy teljesítménysűrűséggel rendelkező, nagyintenzitású lézereknek a fúziós kapszulák felületére fókuszált nyalábjaival, vagy nagy teljesítményű részecskenyalábokkal, ionnyalábokkal történő besugárzással lehet csak biztosítani. Manapság a legfejlettebb stádiumban a lézerekkel történő besugárzás, az ún. lézeres fúzió, vagy csak röviden mondva, lézerfúzió van.³ De milyen teljesítményre, pontosabban intenzitásra képesek a mai lézerek, lézerrendszerek?

² Az anyagsűrűség helyett a Lawson-kritériumban n részecskeszám-sűrűség szerepelt.

³ Innen ered a korábban már említett lézerfúzió elnevezés.

A lézer nyalábját jellemző alapfogalmak

A lézerek működésének elvétől, ill. fizikájának ismertetésétől jelen írásban eltekintünk, hisz ennek az írásnak nem az a célja, hogy az Olvasót megismertesse a lézerek működésével. Erre ma már igen nagy számú, magyar és idegen nyelvű, jobbnál jobb irodalom is lehetőséget nyújt. Jelenleg a világon nagyon sokféle lézerrel, lézerrendszerrel találkozhatunk (pl. festéklézerek, gázlézerek, szilárdtestlézerek és ezek kombinációi.) Az egyes lézereket, lézerrendszereket egymással kombinálva igen széleskörű alkalmazásra nyílik lehetőség. E bonyolult lézerek nyalábjait a legkülönbözőbb fizikai és ipari alkalmazásokra lehet felhasználni. A következőkben ismertetjük a lézerek nyalábjait leíró fizikai alapfogalmakat.

A lézerek nyalábja általában ún. Gauss-nyaláb. Gauss-nyaláb alatt azt értjük, hogy a nyaláb bármely keresztmetszetében az amplitúdó-, illetve intenzitáseloszlás Gauss-függvénnyel adható meg. Azt a távolságot, amelynél a maximális amplitúdó az e -ed részére csökken, a nyaláb sugarának (w) nevezzük, a $2w$ mennyiséget pedig a nyaláb átmérőjének. A nyalábátmérő függ attól, hogy a nyalábot milyen messze vizsgáljuk a fénykibocsátás helyétől. A lézernyaláb minimális átmérőjét nyalábnyaknak ($2w_0$) hívjuk. Azt a távolságot, amelynél a nyalábátmérő a nyalábnyak $2^{0,5}$ -szerese lesz Rayleigh-hossznak nevezzük és (z_R) módon jelöljük. A nyalábnyak és a Rayleigh-hossz által meghatározott térfogatot hívjuk nyaktérfogatnak. Azt a tartományt, amelyre $z \gg z_R$ távoli zónának, és amelyre $z \approx z_R$, közeli zónának hívjuk.

Ha egy lézer Gauss-nyalábját fókuszáljuk, akkor a fókusz átmérőjét a

$$2w_0 = 2c\lambda \frac{f}{d}$$

összefüggés írja le, ahol a $2w_0$ mennyiség a nyalábfókusz átmérője, c a nyaláb diffrakcióját jellemző konstans, λ a nyaláb hullámhossza, f a fókuszáló optika (pl. lencse vagy tükör) fókusztávolsága, d pedig a lézernyaláb átmérője a fókuszáló optikán. Szokás az f/d mennyiséget F -számnak nevezni, amely a fókuszálás minőségét jelzi. (Pl. az $F/2$ -vel jelzett F -szám arra utal, hogy $f/d = 2$.)

A lézer fókuszbeli teljesítményének kifejezésére nem a teljesítményt, hanem a lézernyaláb intenzitását, tehát a felületegységre jutó teljesítményt szoktuk használni, mert ez a mennyiség magában foglalja a lézerfókusz méretét is. Az intenzitást tehát a

$$I = \frac{E}{A\tau}$$

mennyiséggel számíthatjuk ki, ahol E a lézernyaláb energiája, A a lézernyaláb keresztmetszetének felülete az adott helyen, ahol az intenzitást számítjuk

(nyilván a fókuszbeli intenzitás számításakor a fókusz keresztmetszetének felülete), τ egy lézerimpulzus időtartama. Itt kell megjegyezzük, hogy a mai nagyintenzitású lézerek már nem folytonos üzemmódban, hanem ún. impulzusüzemben működnek. Jellemzően egy lézerimpulzus — azaz egy kibocsátott fénycsomag — időtartama a femtoszekundumos tartományba esik.⁴

Hol tart ma a lézerfúzió, mi a jövő?

A mai nagyintenzitású lézerekkel, lézerrendszerekkel igen nagy fókuszált intenzitásokat vagyunk képesek előállítani. Nem ritka a 10^{18} – 10^{21} W/cm² fókuszbeli intenzitás sem⁵. Ezek az intenzitások pedig már elegendők ahhoz, hogy pl. atomok szerkezetét tanulmányozzuk, vagy ha deutérium-trícium fúziós kapszula felületén állítják elő, akkor létrehozzák a mikrorobbantást és begyűjtik a fúziós kapszulát.

A hatékony összenyomáshoz azonban a fúziós kapszulát nagyon szimmetrikusan (a becslések szerint 1-2% homogenitás mellett) kell összenyomni. Ez pedig komoly kihívást jelent a kutatók számára, hiszen ez nem könnyű feladat.

Az Amerikai Egyesült Államokban, Livermoreban, a Teller Ede által alapított laboratóriumban épül fel az a NIF (National Ignition Facility) rendszer, amellyel szabályozott termionukleáris lézerfúziót kívánnak majd megvalósítani. A rendszer alapját az a 192 lézernyaláb jelenti, amellyel megfogják majd löni a gömb alakú, több embernyi átmérőjű vákuumkamra középpontjában elhelyezett deutérium-trícium fúziós kapszulát. A rendszer még építés alatt áll, de úgy tervezik, hogy kb. 2008-ra készen állhat arra, hogy az első lézerfúziós kísérleteket végrehajtsák.

Európában, Franciaországban épül az ún. Laser Megajoule rendszer, amellyel ugyancsak lézerfúziós kísérleteket szeretnének majd végezni 2010 tájékán.

A folyamatosnak tekinthető fúziós energia termeléséhez — így pl. majd egy fúziós reaktorban is — a mikrorobbantást másodpercenként többször is meg kell majd ismételni, ennek végrehajtásához pedig még sok kutatásra, fejlesztésre van szükség.

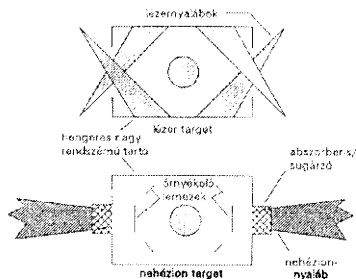
⁴ Ma már kb. 70 attoszekundumos lézerimpulzus is létezik.

⁵ Korunkban a világ legnagyobb fókuszált lézerintenzitása 10^{21} W/cm². Ezt az értéket az angliai Oxfordshire-ben, a Rutherford Appleton Laboratórium egyik lézerrendszerével (VULCAN) érték el. Mindezt a helyszínen kifüggesztett GUINNESS WORLD RECORD elismerő oklevél is bizonyítja.

A lézerefúzió egy másik alternatívája: az indirekt pumpálású mikrorobbantásos fúzió

A korábbiakban ismertetett, lézerekkel történő direkt begyújtásos mikrorobbantásos fúzió megvalósítása sok problémát hozott a felszínre. Pl. a lézereknél nagyobb hatékonyságú ionnyalábokkal is próbálkoztak, de nem jártak sikerrel. A gond az volt, hogy az a jó besugárzási szimmetria, ami a lézerekkel elérhető volt, ionnyalábokkal már nem érhető el. Főleg ez a rendkívül erős szimmetria követelmény vezetett el ahhoz az új elvhez, amelyet *indirekt pumpálású fúzió*nak nevezünk.

Az elv lényege az, hogy a mm átmérőjű deutérium-trícium fúziós kapszulát, valamilyen nehéz, nagy rendszámú elem anyagából készített hengeres alakú, belül üreges tartó belsejébe helyezik. Ilyen hengeres tartó készülhet pl. aranyból. A lézer- vagy ionnyalábot pedig a hengeres tartó belső falára fókuszálják. Tehát nem közvetlenül a deutérium-trícium fúziós céltárgyat lövik meg a lézer- vagy ionnyalábokkal, hanem a tartóedény belső falát (lásd 3. ábra). Innen ered az elnevezés, hogy indirekt pumpálású fúzió. A tárolóedény — más szóval konverter — anyagán a pumpáló nyalábokkal bevitt energia igen nagy hatékonysággal (kb. 60-80%) konvertálható, alakítható át lágy röntgensugárzássá. A röntgensugárzás ebben a tartóban abszorpció, majd pedig reemisszió révén szimmetrizálódik, és ezáltal a fúziós kapszula besugárzása már homogén, azaz egyenletes lesz. Az lehet az indirekt begyújtásos fúzió előnye a direkt begyújtásos verzióval szemben, hogy a fúziós céltárgy megvilágítása sokkal könnyebben szimmetrikussá, egyenletessé tehető. A továbbiakban a kapszula fizikája már a pumpáló lézer- vagy ionforrástól teljesen független lehet, csak a röntgenforrástól függ, az pedig elég jól ismert. Az indirekt pumpálású mikrorobbantásos fúziót meg szeretnék valósítani az Amerikában felépülő NIF rendszerben is.



3. ábra

Az indirekt pumpálású fúzió elve lézer- és ionnyalábokkal történt besugárzás mellett

Magyar részvétel a lézerplazma és lézerfúziós kutatásokban

Európában a fúziós kutatások már évtizedek óta közös projekt keretében folynak, melyben az Európai Unió és a kutatásokhoz társult országok — köztük Magyarország is — vesznek részt. Jelenleg Európában kb. 2000 kutató foglalkozik valamilyen fúzióval kapcsolatos kutatási témával. Ez igen szép szám. A kutatók és a munka koordinálására 1999-ben életre hívták az Európai Fúziós Fejlesztési Együttműködést (EFDA). Ma már a fúziós kutatások olyan szinten állnak, hogy az Európai Unión belül is szinte stratégiai jelentőségűnek tekintik. Ez egyben azt is jelenti, hogy az összes nukleáris témára fordítható pénzek nagy részét erre a területre fordítják. Ennek eredményeképpen ma Európa a fúziós kutatások területén vezető szerepet tölt be a világon. Elmondható, hogy pl. itt található a legtöbb fúziós témával foglalkozó kutató. Örömmel jelenthetem ki, hogy kollégáim és én is tevékeny részesei lehetünk az európai fúziós kutatásoknak. A következőkben röviden — a teljesség igénye nélkül — ismertetünk néhány olyan kutatási eredményt, melyet kollégáimmal a lézerplazma ill. lézerfúziós témákban Magyarországon sikerült elérnünk az elmúlt néhány évben.

Mint azt a fentiekben említettük, szerencsére hazánkban is folyik kutatás a lézerplazmák területén. Az MTA KFKI Rézszecke és Magfizikai Kutató Intézet Plazmafizikai Főosztálya (RMKI PFFO) néhány kutatója ezen a témán dolgozik. A téma vezetője Dr. Földes István. Alapkutatás folyik mind kísérleti, mind elméleti vonatkozásban is, de dominálnak a kísérleti munkák. A kísérleti munkákat nem az RMKI-ban, hanem Szegeden, a Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékének Nagyintenzitású Lézer Laboratóriumában (továbbiakban HILL, High Intensity Laser Laboratory) végezzük. Ezt a laboratóriumot Prof. Dr. Szatmári Sándor tanszékvezető egyetemi tanár alapította és vezeti ma is. Az együttműködés gyümölcsöző, és már régóta tart. A HILL-ben jelenleg több olyan nagyintenzitású lézer is üzemel, amelyekkel kutatók és egyetemi hallgatók is dolgozhatnak. A lézerplazma kutatásokon kívül a HILL-ben szilárdtestfizikai és a lézerek fejlesztésére irányuló kutatások is folynak. A labor különböző excimer lézerekkel, lézerrendszerekkel van felszerelve. A nagyintenzitású lézereket illetően a HILL-ben két olyan impulzusüzemű femtoszekundumos hibrid KrF excimer-festéklézer rendszer is működik, amelyet Szatmári Sándor professzor fejlesztett ki. Az említett lézerrendszer paraméterei a következők: a lézer hullámhossza 248 nm, impulzushossza kb. 600 fs, a nyaláb energiája úgy 15-20 mJ, a nyaláb keresztmetszete 2×3 cm. Az excimer lézerek közismerten jó nyalábminősége lehetővé teszi komoly lézerplazma-kísérletek elvégzését. Talán itt kell szólnunk arról, mit is nevezünk lézerplazmának. Ha valamely nagyintenzitású lézer nyalábját szilárdtest céltárgyra vagy gázba fókuszál-

juk, akkor a fókuszban olyan nagy intenzitás érhető el, amely már ionizálni képes a közeget, pontosabban plazmát kelt a közegben. Ezt a plazmát szoktuk lézerplazmának nevezni, és a fizikának az ezzel foglalkozó szakterületét lézerplazma-fizikának hívni.

A HILL-ben a jelenleg is folyó kísérletek során arra törekszünk, hogy koherens röntgensugárzási forrást állítsunk elő. A koherens röntgensugárzási források előállítása és tanulmányozása rendkívül fontos a korábban ismertett direkt és indirekt pumpálású fúziós elképzelésekben is, a kapszula pumpálási és energiatranszport folyamatainak vizsgálataiban. Koherens röntgensugárzási forrás létrehozásának egyik módszere az, hogy lézerplazmákban felharmonikusokat keltünk. A szilárdtest céltárgy felületére fókuszált ultrarövid lézerimpulzus lézerplazmát hoz létre. Az így keletkezett plazma elektronjait a keltő lézer extrém nagy elektromágneses tere olyan rezgőmozgásra kényszeríti, amely már nem harmonikus, hanem anharmonikus rezgés. Az igen meredeknek mondható plazmafronton, vagy más szóval plazmagradiensen anharmonikusan rezgő elektronrendszer sugárzást bocsát ki. Ebben a sugárzási térben a gerjesztő lézerfény felharmonikusait is megfigyelhetjük. Ezt a tényt sok elméleti és kísérleti munka is igazolta. Korábban főleg szilárdtestlézerekkel dolgoztak. Azonban egy későbbi elmélet szerint (Gibbon, 1997) KrF excimer lézerrel is hatékonyan kelthetők magas rendű felharmonikusok. Ez azután kísérletekkel is beigazolódott, melyeket többek között dr. Földes István és munkatársai végeztek már jó néhány évvel ezelőtt. Az elvégzett kísérletekből arra a következtetésre juthattunk, hogy a harmonikusok keltését sok tényező befolyásolja. Fontos szempont a keltő lézer paramétereinek — hullámhossz, impulzushossz, polarizáció — figyelembe vétele, és szükséges a nagy fókuszbeli intenzitás, továbbá a főimpulzus és az erősített spontán emisszió (ESE) közötti intenzitásarány, más szóval intenzitáskontaszt minél nagyobb volta is. Itt jegyezzük meg, hogy a HILL-ben működő excimer lézerrendszer egy impulzusának időbeli alakulása olyan, hogy egy jellemzően 15 ns hosszú erősített spontán emissziós jel közepén helyezkedik el az éles, erős, kb. 600 fs hosszú tulajdonképpen rövid impulzusú csúcs, ami a tényleges rövid lézerimpulzus. Tehát az erősített spontán emissziót felfoghatjuk úgy is, mint az erősítő olyan optikai zaját, amely a lézerplazma-kísérletekben káros. Ugyanis fókuszálva a nyalábot, fókuszálódik ez is. Mivel azonban az ESE időben előbb éri el a céltárgy felszínét, így ha elég nagy az energiája, akkor plazmát kelthet a céltárgyon, és ekkor a tényleges rövid lézerimpulzus már nem közvetlenül a szilárdtest céltárggyal, hanem az ESE által keltett ún. előplazmával lép kölcsönhatásba, ezáltal egészen más kísérleti feltételeket teremtve. Mindezekre a felsorolt fontos szempontokra nagy hangsúlyt fektetve végeztük kísérleteinket.

Kísérleteinket Szatmári-típusú KrF hibrid excimer-festéklézer rendszer

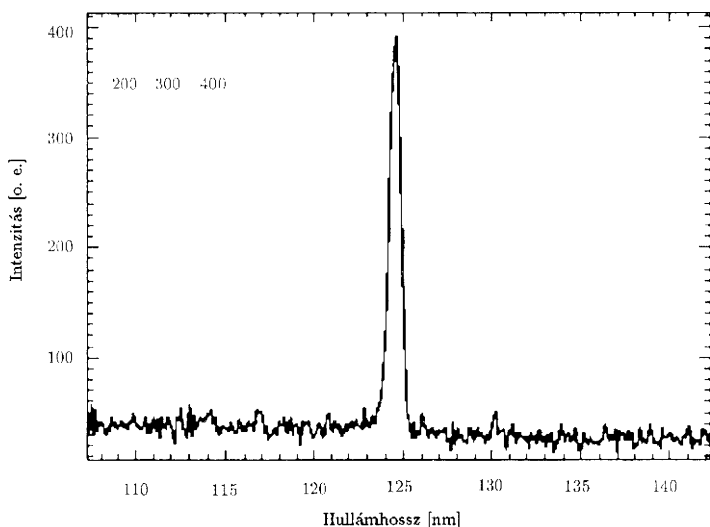
nyalábjával végeztük. A nagy fókuszált intenzitás elérése érdekében a korábbi $F/10$ -es F -számú (az F -számot lásd korábban) lencsével történt fókuszálás helyett a nyalábot egy $F/2$ -es ún. „off-axis” — magyarul talán ferde beesésűnek fordítható — parabolatükörrel fókuszáltuk a céltárgyak felszínére.

A parabolatükör előnye a lencsés fókuszálással szemben, hogy használatakor sem szférikus aberráció, sem pedig kromatikus hibák nem lépnek fel. Továbbá kiemелendő még, hogy az $F/10$ -es fókuszálás helyett $F/2$ -es fókuszálást alkalmaztunk, ami lényegesen jobb fókusz eredményez. A leírt tényekből eredendően kis átmérőjű fókuszfoltot vártunk. Mivel a lézernyalábbeli fázis- és csoportsebesség nem válik szét a tükörrel való fókuszálás miatt (ugyanis a nyaláb nem hatol be a fókuszáló optika anyagába, azaz mindvégig azonos közegben halad), ezért a nyalábintenzitás sem fog csökkenni a fókuszálás során. A parabolatükör használatának a sok előnye mellett azonban van hátránya is. Márpedig az, hogy a helyes beállítása nagyon nehéz. Ezért a kísérleteinkhez olyan elrendezést építettünk fel, amelynek használata maximálisan segíti a parabolatükör beállítását. A sikeres fókuszálás eredményeképpen kb. $2\text{ }\mu\text{m}$ -t fókuszfoltátmérőt kaptunk, ami megfelelt az előzetesen várt, számított értéknek diffrakciólimitált lézernyalábra. Mindezeknek megfelelően a fókuszban közelítőleg $5 \cdot 10^{17}\text{ W/cm}^2$ intenzitást értünk el. A 45° -os beeséssel elhelyezett céltárgyon ez az érték $3 \cdot 10^{17}\text{ W/cm}^2$ -re módosult. Ez az intenzitás így is hitetetlen nagynak tekinthető, ha összehasonlítjuk azzal, hogy a Napból a Föld légkörének határához kb. $0,1374\text{ W/cm}^2$ fényintenzitás érkezik, és ebből a Föld felszínére már csak kb. $0,012\text{ W/cm}^2$ fényintenzitás jut a reflexió és a légköri elnyelés miatt. Megjegyezzük még, hogy a fókuszunkra jellemző Rayleigh-hossz (meghatározást lásd korábban) kb. $6\text{ }\mu\text{m}$ volt. Meghatároztuk csak az erősített spontán emisszió fókuszbeli intenzitását is. Ekkor a femtoszekundumos főimpulzust kitakartuk, hogy a lézerlövés csak az ESE impulzusból álljon. A fókuszsíkból az ESE intenzitása kb. 10^7 W/cm^2 -nek adódott. Ez az intenzitás pedig már nem kelt előplazmát a céltárgyon, sőt a fotoablációs és a fotoionizációs küszöböt sem érjük el, így lézerplazma-kísérleteinket az ultrarövid impulzussal tiszta, előplazmamentes körülmények között végezhetjük, tehát a lézernyaláb közvetlenül a szilárdtest céltárgy felületével lép kölcsönhatásba. Az intenzitáskontrasztunk (azaz a főimpulzus fókuszbeli és az ESE fókuszbeli intenzitásának aránya) 10^{10} , ami remeknek mondható.

A felharmonikus-keltési kísérleteinkhez ilyen fókuszált nyalábot használtunk. A céltárgyak felületén keltett plazma spektrumát egy általunk tervezett és megépített vákuum-ultraibolya spektrométerrel vizsgáltuk. A spektrométerünk bontóeleme egy 550 l/mm -es holografikus toroidális (tehát görbített felszínű) rács, detektora pedig egy foszforernyővel ellátott MCP

(microchannel-plate) volt. Az MCP detektort úgy kell elképzelni, mintha igen sok apró fotoelektron-sokszorozót helyeznénk el egymás mellett, vagy fognánk össze egymással úgy, hogy azok hasznos, érzékeny felülete néhány cm^2 detektor felületet alkossanak.

Eddigi méréseink során p - és s -polarizált beeső lézernyalábbal is dolgoztunk. Üveglemezekre felvitt 500 nm vastag alumínium és bór, illetve 269 nm vastag szén rétegek szolgáltak céltárgyakként. A nagy intenzitással végzett kísérletek is intenzív harmonikusokeltést mutattak, mind p -, mind s -polarizált beeső lézerfény esetében is, mindhárom céltárgyon. Szép, intenzív 2. és 3. felharmonikust detektáltunk, de ezeken felül megfigyelhető a 4. felharmonikus is 62 nm-es hullámhosszon. Két vákuum-ultraibolya spektrumot az alábbiakban mutatunk be.



4. ábra

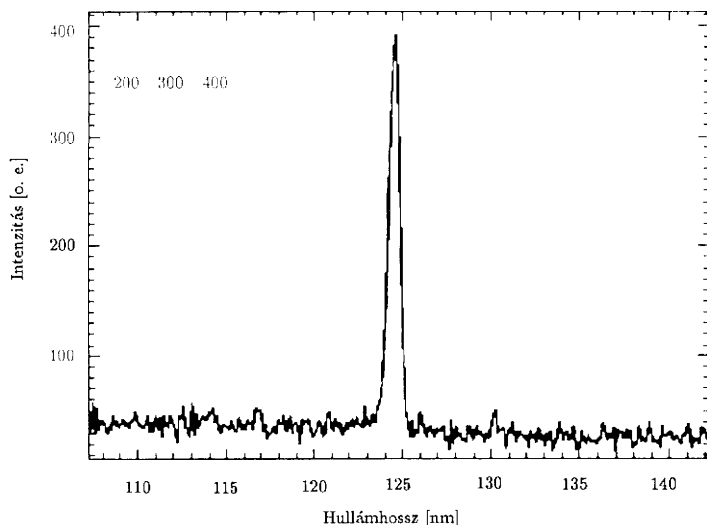
A 248 nm hullámhosszú lézerimpulzus 2. felharmonikus spektruma
alumínium céltárgyon

A 4. ábrán szép, intenzív 2. harmonikus csúcsot láthatunk az alumínium céltárgyról felvett vákuum-ultraibolya spektrumon. Hasonlóan szép 2. harmonikus csúcs látszik egyébként minden céltárgyon. Jól látható a 4. ábrán az is, hogy a jelzett hullámhossz tartományban nincs olyan alumínium spektrumvonal, mely zavarná a felharmonikusok detektálását (tudatosan, ilyen szempontokat is figyelembe véve választottuk ki céltárgyainkat).

Az 5. ábra igen szép szén vákuum-ultraibolya spektrumot mutat a 43–83 nm-es hullámhossztartományban. 82 nm körül szépen látható a detektált 3. felharmonikus. Itt jegyezzük meg, hogy a bontóelemként használt

toroidális rács a spektrométerünkben 1 : 1 módon a céltárgyon keltett plazmát, mint tárgypontot az MCP detektor felszínén ponttá képezi le. Ez azt jelenti, hogy a spektrum a detektor felszínén csak egy viszonylag kis tartományban éles. Jelen esetben — a beállításból következően — 62 nm körül. Így magyarázható az, hogy a 3. harmonikus nem pont a 82,6 nm-es hullámhosszbeosztáshoz esik. Hasonlóan a spektrum kisebb hullámhosszak felé eső oldalán is tapasztalható e leképezési hibából adódó torzítás. A 4. felharmonikus szépen látható 62 nm-en. Az 5. felharmonikus léte ezen a spektrumon kérdéses, mivel egybeesik a szén egy intenzív spektrumvonalával. Tehát az 5. harmonikus detektálásához más céltárgyat kell használni. A spektrumon a felharmonikusok mellett láthatók szilícium spektrumvonalak is. Miért? Céltárgyainkat üvegre vittük fel adott vastagságokban. A látott szilícium spektrumvonalak arra adnak szép bizonyítékot, hogy a lézerlövés céltárggyal való kölcsönhatása eredményeként a lézer által üvegrétegig és ionizálja azt. Ezt alátámasztják Németországban, Garchingban a témához kapcsolódóan végzett szimulációk is.

Fenti kutatásainkat több OTKA pályázat is támogatta és támogatja.



5. ábra

A 248 nm hullámhosszú lézerimpulzus 3. és 4. felharmonikusa
szén céltárgyon

Összefoglalás

A bevezetőben rámutattunk arra, hogy becslések szerint Földünk energiaigénye az évek teltével rohamosan növekedni fog mégpedig várhatóan

olyan mértékben, hogy a most rendelkezésre álló energiahordozók nem, vagy csak nehezen lesznek képesek fedezni a szükségleteket. Azonban úgy tűnik, hogy néhány év, vagy évtized múlva rendelkezésünkre állhat egy olyan új energiaforrás, amely környezetbarát módon kimeríthetetlen mennyiségben termelhet energiát. Ez a fúzió. Ebben a cikkben említést nyertek a fúziós energiatermelés ma legfontosabbnak tartott módszerei, elvei, fő hangsúlyt fektetve a mikrorobbantásos fúzióra. Szó esett a lézerfúziós kutatásokban való magyar részvételről is, néhány a lézerplazma témakörben született hazai eredmény ismertetése kapcsán.

Az elvek, módszerek leírásakor, azokat csak az alapok szintjén, a könnyű érthetőséget szem előtt tartva mutattuk be. Célunk mindezzel az volt, hogy bevezessük a tisztelt Olvasót a fúziós energiatermelés lehetőségeibe és ismer-tessük a ma ismert alapelveket. Reméljük, sikerült felkelteni a tisztelt Olvasó érdeklődését a téma iránt, és felhívni a figyelmét arra, hogy mennyire fontos területe ma a fizikának a fúzió emberiséget kiszolgáló, barátságos célra, energiatermelésre való felhasználásának kutatása.

A fizika tantárgy kedveltségének változása az érettségihez közeledve*

Vida József

EKF Fizika Tanszék

Abstract. Changes in the popularity of physics during the school-years.

A basic assumption of the paper is that pupils' love of a subject (the 'attitude level' as it is often named) is proportional with the performance of the pupils in that subject. Another aspect of the problem is that the intensity of pupils' work is determined on a rational basis, i.e. influenced by their career orientation. This trend can be changed, according to the author's opinion, by increasing the ratio of the experiments in physics teaching. Experiments give an emotional surplus to the attitude level and it may increase the popularity of physics. The above theses are proved by statistical evaluation of surveys.

Nemzetközi felmérések szerint a magyarországi 7. és 8. osztályos tanulók természettudományos teszten elért eredményei az átlag fölött vannak, míg az utolsó éves középiskolások teljesítménye messze lemaradva a nemzetközi átlagtól, a 21 ország sorában csak a 18. ([1]). Hazai pedagógiai körökben folytatott beszélgetések is megerősítették a fentieket, pontosabban azt, hogy az érettségi felé közeledve a tanulók fizika tantárgyi tudásszintje az elvárthoz képest évről évre fokozatosan csökken. A nemzetközi felméréseket tanulmányozva úgy tűnik, ez a tendencia magyar sajátosság. Vajon mik lehetnek az okai, hol húzódnak a gyökerei e nemkívánatos jelenségnek?

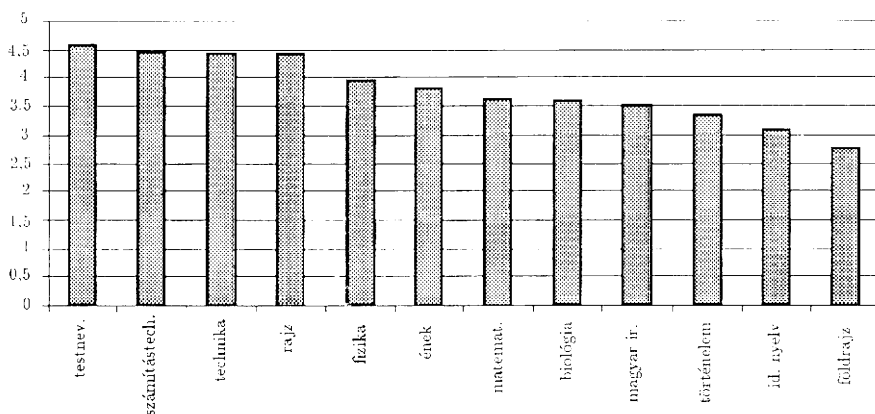
Feltételezésünk szerint a tanulók adott tantárgyhoz való viszonyulása, kötődése (attitűdje) és a tanulók tantárgyi teljesítménye között összefüggés van. Pl. ha egy tanuló kedveli a fizikát, akkor nagy valószínűséggel jó eredményeket ér el belőle, s ez fordítva is így van. Bár a nemzetközi mérések adataiból szoros korreláció nem mutatható ki a kettő között (igaz, konkrétan ezt nem is mérték), pedagógus kollégák körében végzett interjúk eredményei egybeestek feltételezésünkkel. (Ez utóbbi ösztönzően hatott az ilyen irányú kutatásaink elkezdéséhez.) Úgy gondoltuk tehát, hogy ha korreláció van a tanulók tantárgyi teljesítménye és a tantárgyhoz való viszonyulása között,

* Kivonat Vida József: A kísérlet mint a fizikatanítás motivációs bázisa című PhD dolgozatából.

akkor ez utóbbi kutatásával a teljesítményromlás okait is felfedezhetjük. Mindenekelőtt azt vizsgáltuk, hogy a tanulók fizikához való viszonyulása a tanévek múlásával hogyan változik, és a változás milyen okokra vezethető vissza. Jelen dolgozatunkban röviden összefoglaljuk az elért eredményeket.

A probléma feltárásához általános iskolai tanulók és általános iskolában tanító tanárok, valamint középiskolai tanulók körében végeztünk kérdőíves felméréseket. Ezen felmérések eredménye az országos populációra nem terjeszthető ki (a minta nem reprezentatív) sem a minta elemszáma, sem a kiválasztás helyszíneinek megválasztása miatt. Eddigi munkáitainkat tehát csak előzetes felmérésnek tekintjük egy átfogóbb, mélyrehatóbb vizsgálat-hoz. Az eredmények sok esetben elgondolkoztatóak, ezért közreadását érde-mesnek tartjuk. Közeli szakmai berkekben fizikatanár kollégák kimutatása-inkkal egyetértve, hasonlóan ítélik meg saját környezetükben is a meglévő állapotokat.

Általános iskolai tanárok 156 fős mintáján, kérdőíves módszerrel vég-zett felmérésünk alapján az általános iskolában a fizika tantárgy kedveltsége még elfogadható. A megkérdezett tanárok több mint 70%-a vallja, hogy a fizika nem sereghajtó a tantárgyak sorában. Ugyanez következik a megkérde-zett általános iskolai tanulók válaszaiból is. A fizika pl. a 6. osztályban a 13 tantárgy között az 5. helyen található (1. ábra). (A mérést olyan iskolákban végeztük, ahol 6. osztályban is van fizika.)



1. ábra

A tantárgyak kedveltségi szintje a 6. osztályban 5 fokozatú skálán mérve

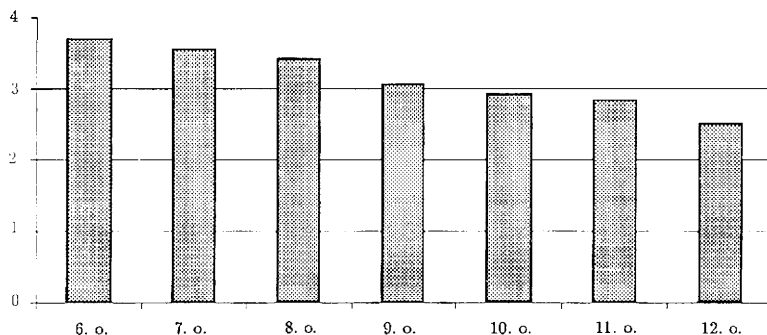
Annak igazolására, hogy ez a korosztály még szereti a fizikát, idézünk néhány tanulói kijelentést:

„Sok kísérletet láttunk.”; „Az új ismeretek mindig érdekesek.”; „Könnyen tanulható tantárgy a fizika.”; „Érdekes tantárgy a fizika.”; „A fizika-

órák mindig izgalmasak voltak.”; „Az életben sok hasznát vesszük a fizikának.”; „Játékos jellegűek voltak az órák.”

Középiskolás diákok véleményét kértük ki év végén arról, hogy most és a korábbi tanévek alatt mennyire kedvelték a fizika tantárgyat. Az adatok elemzése során egyértelművé vált, hogy a tanulók fizika iránti kötődése a tanévek múlásával egyre csökken. A 844 tanuló ötfokozatú skálán minősíthetett (2. ábra). A hatodik osztályos fizika 3,65, a hetedik 3,50, a nyolcadikos pedig már csak 3,35 pontot kapott a 9., 10. és 11. osztályos diákoktól. A 9., 10. és 11. osztályos tanulók a 9. osztályos fizikát 3,13, míg a 10. és 11. osztályosok a 10. osztályos fizikát 3,07 ponttal értékelték. (A végzős diákok teljes körűen nem vettek részt a mérésben.) Ezt követően a szignifikancia próbát (t -próbát) is elvégeztük, ami minden esetben 95% feletti valószínűséget mutatott. (Ez azt jelenti, hogy a fenti eredmény nem lehet a véletlen műve.)

Ugyanezen mintába tartozó tanulóktól megkérdeztük, hogy aki szereti, ő miért, illetve aki nem szereti, ő miért nem szereti a fizikát. (Az alábbiakban csak ez utóbbi vizsgálati eredményeket mutatjuk be.)



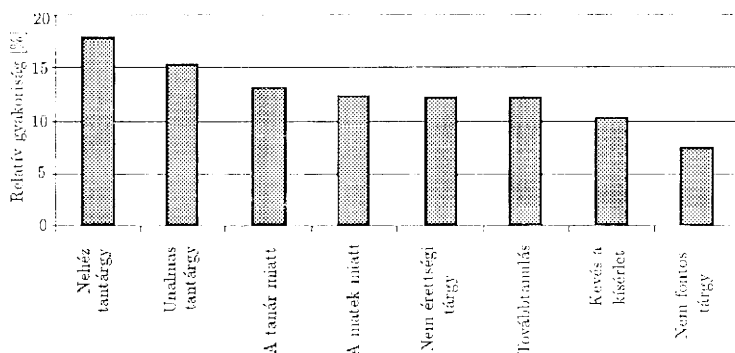
2. ábra

A fizika tantárgy kedveltsége az általános és a középiskolában 5 fokozatú skálán mérve

A fizikát nem kedvelő tanulók legtöbbször a tantárgy *nehézségét* nevezték meg (3. ábra). Nagy valószínűséggel e tanulók többségénél a természettudományos gondolkodás nem eléggé kifejlett (pl. humán beállítottság, kezdeti tartó érdektelenség). Ha a tanulók által megnevezett okokat egymás kapcsolatában is megvizsgáljuk, akkor a tantárgy nehézségét megnevezők közé sorolhatók azok a tanulók is, akik a *matematika miatt* nem szeretik a fizikát.

Az így összevont kategóriába már a tanulók közel egyharmada tartozik. Idéziünk jellemző tanulói megjegyzéseket:

„Rengeteg a képlet, levezetés.”; „Bonyolult, száraz tantárgy a fizika.”; „Ahogy telnek az évek, egyre nehezebb.”; „Rettenetesen nehéz tantárgy.”; „Számomra azért nehéz, mert én humán beállítottságú vagyok.”; „Nekem a számítások nehezen mennek.”; „Gyűlölöm, nagyon, nagyon nehéz.”; „Középiskolában már sokkal többet kell tanulni, sok a szabály és a képlet.”; „Állandóan csak feladatokat oldunk meg.”; „A 6. és 7. osztályban a fizika még nagyon könnyű volt, most viszont már annyira bonyolult, hogy egy kisebb zseninek kell lenni megértéséhez.”; „Teljes káosz, érthetetlen magyarázat, a feladatokat csak az tudja megoldani, aki egész nap ezzel foglalkozik.”



3. ábra

Miért nem szeretik a középiskolás diákok a fizika tantárgyat?

A *kevés a kísérlet* és az *unalmas tantárgy* kategóriák között sem nehéz összefüggést találni. Ha egy kalap alá vesszük a kettőt, akkor ide a tanulók egynegyed részét sorolhatjuk. Néhány tanulói vélemény:

„Unalmas volt minden fizikaóra.”; „Nem találtam semmi érdekeset benne.”; „Ha lenne kísérlet, talán megszeretném.”; „Egyre ritkábban kísérletezik a tanár.”; „Egy normális kísérletet nem képes bemutatni. . .”; „Unalmas, mint az atom.”(?); „Soha nem szerettem a fizikát, mindig unatkoztam ezen az órán, csak a kísérletek kötöttek le.”; „Olyannyira nem köt le, hogy jóformán azt se tudom, van e könyvünk, és volt e házi feladat.”

A diákok egy jelentős része a különböző tantárgyak tanulását nem érzelmi, hanem tudati alapon szervezi. Megfontolják, hogy mely tárgyakat érdemes tanulni. Ha egy tantárgy *nem érettségi tárgy*, vagy nincs rá szükség a *továbbtanuláshoz*, akkor nem érdemes foglalkozni vele. Ezt vallja a diákok egynegyed része. (A 12. osztályba járók 36%-a.) Néhány jellemző kijelentés:

„Csak annak fontos, aki fizikatanár akar lenni.”; „Vannak, akik szeretik a fizikát, de inkább a jövőjüket meghatározó, fontosabb tantárgyakat tanulják.”; „Egyre inkább az érettségre gondolok, és a nem érettségi tárgyak a

hátterbe szorulnak.”; „Olyan tantárgyat választok az érettségire, amelyikre könnyű felkészülni.”

A középiskolás diákok 13%-a *a tanár miatt* nem kedveli a fizikát. A kérdőív kitöltése név nélkül történt, ezért fordulhatott elő néhány erősebb vélemény is. Ami vigasztaló lehet, hogy a tanárt okoló diákok nem szórványosan innen-onnan, hanem egy-egy adott osztályból, vagy iskolából kerültek ki. A nyomdafestéket nem tűrő véleményeket mellőzve, lássunk néhányat:

„A tanárnő felolvasta a tankönyvből az anyagot, és semmit sem magyarázott meg.”; „Annyiból áll a fizikaóra, hogy a tanteremben ülünk.”; „Pont az a tanár tanítja a fizikát, akit nem szeretek.”; „Nem jól magyaráz a tanár, ezért nem is szeretem az óráit.”; „A tanár egyszerűen nem tudja megértetni az anyagot. Nem nagyon magyarázza el, és csodálkozik, amikor nem tudjuk.”; „Utál minket, mindig csak ő beszél, hiába jelentkezem, nem veszi észre.”; „Az órát elbeszélgetjük, a leckét meg feladja otthonra.”; „A tanár csak a jó tanulókkal foglalkozik.”; „Szememben azért csökkent a tanár népszerűsége, mert nála nem a tudás a mérvadó. Ha valaki kimásol a lexikonból egy oldalt szorgalminak, az ötöst kap.”

A megkérdezettek 7%-a tartja a fizikát *nem fontos tárgynak*, szerintük az életben a fizikában tanultakra nem lesz szükség. Íme néhány megnyilvánulás:

„A fizikát nincs értelme a középiskolában négy évig tanulni, mert nincs semmi haszna.”; „Mindig is utáltam a fizikát, most is utálok, fogalmam sincs mi értelme van.”; „A középiskolában olyan fizikát tanulunk, amelyiknek nem látom hasznát.”; „Én humán beállítottságú vagyok és a fizikára soha nem lesz szükségem az életben.”; „Az életben a fizikából tanultaknak csak nagyon minimális részét fogom tudni hasznosítani.”; „A konnektorba fizikatanulás nélkül sem piszkálok bele.”

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy a diákok fizikához való kötődése az érettségihez közeledve egyre lazább. (A tantárgy kedveltsége a tantárgyi teljesítményekkel együtt csökken.)

A tanulók véleménye szerint ennek okait az alábbiakban foglalhatjuk össze:

1. A fizika tananyaga a magasabb évfolyamokon a tanulók átlagos értelmi szintjéhez viszonyítottan nehéz. Ezt tetézi a ma tanított tananyag fokozott matematikaigénye, és a feladatcentrikus oktatás.

2. Minthogy a fizika nem érettségi tárgy, és kicsi azon tanulók aránya, akiknek a továbbtanulásához szükséges, a diákság többsége a *nem fontos tantárgyak* közé sorolja, és úgy is kezeli. Ha korábban voltak is, akik kedvelték a fizikát, az érettségihez közeledve „hanyagolják”, és praktikus okok miatt más tantárgyak felé fordulnak.

3. Sok tanuló a fizikát unalmasnak tartja, hiányolják a kísérleteket. A

kísérletezés a fizika tanításának alapvető módszere, de emellett a fizika megszerettetésének legfontosabb eszköze. Elhagyása, mással való pótlása nemcsak pedagógiai hiba, hanem egyben vétek is a fizika tantárggyal és a fizikát tanulókkal szemben.

Következtetéseket nem akarunk levonni, a fenti pontok önmagukért beszélnek. Úgy gondoljuk, a fizika megszerettetése fontos cél, hiszen a fizikának különleges szerepe van az oktatásban: bármely természettudomány elsajátításához sok, egyre több fizikai ismeretre van szükség. Lényeges elemként szerepel továbbra is a társtudományokban, a környezeti és energiaproblémák megoldásában, és a közeljövő három legdinamikusabban fejlődő ágazatában: az informatikában, a biotechnológiában és a nanotechnikában.

Irodalom

- [1] PAPP KATALIN: Ami a számszerű eredmények mögött van... Fizikai Szemle 2001/1.

A karika gurításának mechanikai elemzése

Kovách Lászlóné

EKF Fizika Tanszék

Abstract. *Mechanical analysis of rolling a hoop.* The study is about the physical analysis of the characteristic motion-group of hoops, one of the apparatus of rhythmic sportive gymnastics. With the application of physical principles it determines the original demands of different straight rollings. It brings about correlation among the angular velocity of the hoop, its angular velocity and the area. Taking all these into consideration the route of hoop, its time and the distance can be planned.

1. Bevezetés, irodalmi áttekintés

A fizika törvényeinek ismerete, eredményeinek tudatos alkalmazása több tudományág fejlődését gyorsította meg. A mozgások leírásával, okainak feltárásával — mint ismeretes — a mechanika foglalkozik. Így a sporttudomány és a mechanika kapcsolata elvitathatatlan. A fizikai összefüggések figyelembevételével, tudatos alkalmazásával a sportszakemberek optimális edzésterveket, illetve gyakorlatokat állíthatnak össze. Másrészt a sport — az ember és a sportszerek mozgásának kimeríthetetlen variációjával — lehetőséget ad a fizikusnak a mechanika törvényeinek gyakorlatban történő megfigyelésére, a különböző mozgások elemzésekor azok alkalmazására.

Sok neves magyar és külföldi fizikus tanulmányozta — s teszi ezt ma is — az ember mozgását, a sportszerekkel való kapcsolatát, illetve a szerek mozgását. Az emberi test mozgásának elemzése — a mechanika ismeretanyagának és módszereinek felhasználásával, az anatómiára, antropológiára, élettanra támaszkodva — egy új tudományág kialakulásához vezetett. Ez az új tudományág a sportmozgások biomechanikája ([2], [3], [6], [9], [10], [12]).

A sportszerek mozgásának elemzése ugyancsak gazdag irodalommal rendelkezik. A szakirodalomban fellelhető nagyszámú tanulmány foglalkozik a különböző sportágakban szereplő sporteszközök mozgásanalízisével, az optimális kezdőfeltételek meghatározásával ([4], [5], [7], [8], [11]).

A ritmikus sportgimnasztika viszonylag rövid múltra tekint vissza. A kéziszer mozgatása és mozgása a sportág szigorú szabályai szerint történhet. Ahhoz, hogy egy kéziszer pontosan úgy mozogjon, ahogy azt a sportoló

akarja, a fizika által meghatározott lehetőségeket és korlátokat ismerni kell. Dolgozatomban az egyik kéziszér, a karika mozgásának fizikai elemzésével foglalkozom.

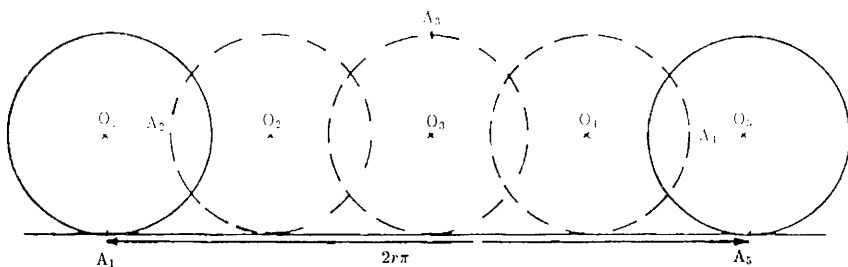
A gyakorlatokban a karika és a sportoló sok esetben külön mozog, például dobáskor, gurításkor, pörgetéskor. A karika pályáját pontosan előre meg kell tervezni. Ez a mozgás mechanikai elemzésével kezdődhet.

2. Problémafelvetés

A karika változatos mozgásai közül vizsgáljuk meg a gurítást. A ritmikus sportgimnasztika szabályosnak fogadja el azt a mozgást, amikor a karika tisztán gördül. Adott fizikai állandók ismeretében milyen kezdeti feltételek esetén jön létre ez a mozgás, mikor gördül egyenes mentén a karika, s milyen kezdőfeltételek kellene ahhoz, hogy a karika ugyanazon a pályán visszafelé is gördüljön? Miért és mikor lesz a pálya kör? Ezeknek a kérdéseknek a megválaszolásához a forgó mozgás törvényeivel kell tisztában lennünk.

2.1.a. Tisztán gördülés, a karika gurítása

A karikatechnika egyik jellemző csoportja a gurítás. Ez a mozgás a fizikában a tisztán gördülésnek felel meg. Mit is jelent ez a fogalom? A karika mozgása — amely tulajdonképpen forogva haladást jelent — két alapmozgásra bontható: egyrészt egy \vec{v}_0 sebességű translációra, másrészt egy ω_0 szögsebességű forgásra a tömegközéppont körül. Ha a tornász kezdeti feltételként biztosítani tudja a $v_0 = v_k$ teljesülését, azaz a translációs sebesség már indításkor megegyezik — a tömegközéppont körüli forgásból adódó — kerületi sebességgel, a karika tisztán gördül. Nézzük meg a karika helyzetét $\frac{T}{4}$ időközönként, ahol T egy teljes körülfordulás idejét jelenti:



1. ábra

A kiszemelt A pont és O középpont helyzetei az 1. ábra jelöléseivel:

$t:$	0	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{3T}{4}$	T
$A:$	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$O:$	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5

Tehát a karika T idő alatt $\overline{A_1 A_5} = \overline{O_1 O_5} = 2r\pi$ utat tett meg, illetve a kerületi pontok a tömegközéppont körül éppen egy teljes kört írtak le. Dolgozatomban a következőkben a vektor nagyságát a vektor betűjelével jelölöm. Például: $|\vec{a}| = a$.

Így a transzlációs sebesség nagysága:

$$(1) \quad v_0 = \frac{2r\pi}{T},$$

és

$$(2) \quad v_k = \frac{2r\pi}{T}$$

a kerületi sebesség nagysága. (1) és (2) alapján

$$(3) \quad v_0 = v_k$$

adódik.

2.1.b. Ha a transzlációs sebesség nem egyenlő a karika kerületi sebességével, a karika és a talaj között fellépő súrlódási erő hatására — egy bizonyos idő eltelte után — létrejöhet a kiegyenlítődés.

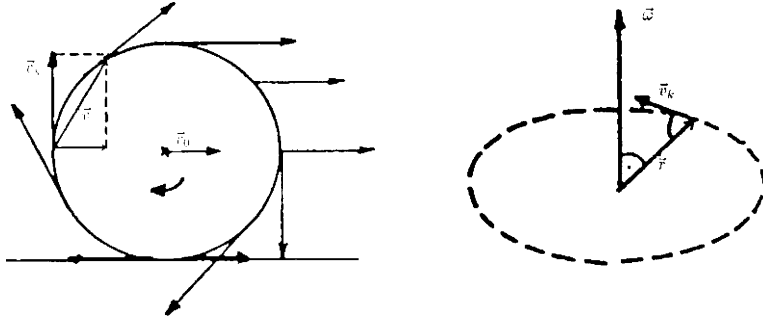
Legyen

$$(4) \quad v_k > v_0,$$

ahol v_k a kerületi sebesség, v_0 a transzlációs sebesség, tehát $r\omega_0 > v_0$. A karika tetszőleges pontjának a földhöz viszonyított sebessége:

$$(5) \quad \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_k,$$

ahol \vec{v}_0 a transzlációs sebesség (ezzel a sebességgel mozog a tömegközéppont), $\vec{v}_k = \vec{\omega} \times \vec{r}$ ahol $\vec{\omega}$ a szögsebességvektor, \vec{r} pedig a középpontból az adott pontba mutató vektor. A vektorális szorzat definíciója értelmében \vec{v}_k minden pontban érintő irányú (2. és 3. ábra).



2. és 3. ábra

A feltétel értelmében a talajjal érintkező A pont talajhoz viszonyított sebessége a $t = 0$ időpillanatban legyen \vec{v}_A . (5) alapján $\vec{v}_A = \vec{v}_0 + \vec{v}_k$.

Mivel ebben a pontban \vec{v}_A és \vec{v}_k ellentétes irányúak, így összegük nagysága a két vektor abszolút értékének különbsége, s a (4) feltétel miatt \vec{v}_k irányába mutat:

$$(6) \quad v_A = r\omega_0 - v_0.$$

Mivel $v_A = r\omega_0 - v_0 > 0$, így a súrlódási erő előre mutat. Szerepe: csökkenti a kerületi sebességet, növeli a translációs sebességet (4. ábra).

A mozgásegyenletek:

$$(7) \quad m\vec{a} = \vec{F}_s$$

a tömegközéppont tétele értelmében, és

$$(8) \quad \theta\vec{\beta} = \vec{M}_s$$

a forgómozgás alapegyenlete a tömegközépponton átmenő, a karika síkjára merőleges tengelyre (t), ahol m a karika tömege, \vec{a} a tömegközéppont gyorsulása, θ a karika tehetetlenségi nyomatéka az t tengelyre, \vec{F}_s a súrlódási erő, \vec{M}_s a súrlódási erő forgatónyomatéka az t tengelyre, $\vec{\beta}$ a szöggyorsulás az t tengelyre.

A gyorsuló, illetve lassuló mozgás addig a t_1 időpillanatig tart, amíg

$$(9) \quad v_0(t_1) = v_k(t_1)$$

be nem következik.

Mivel a

$$(10a) \quad v_0(t_1) = v_0 + at_1,$$

$$(10b) \quad v_k(t_1) = r\omega_0 - r\beta t_1$$

összefüggésekkel írhatjuk le az egyenletesen változó egyenesvonalú, illetve a körmozgás sebességét az idő függvényében, a (9) feltétel miatt

$$(11) \quad v_0 + at_1 = r\omega_0 - r\beta t_1.$$

Így

$$(12) \quad t_1 = \frac{v_0 - r\omega_0}{a + r\beta}.$$

A (7) és a (8) egyenletből a $\theta = mr^2$, $F_s = \mu mg$ és $M_s = \mu mgr$ helyettesítéssel az

$$(13) \quad a = \mu g,$$

$$(14) \quad \beta = \frac{\mu g}{r}$$

egyszerű kifejezéseket kapjuk a gyorsulás, illetve a szöggyorsulás nagyságára. Ebből az

$$(15) \quad a_0' = r\beta = a_k$$

összefüggéshez jutunk. Ez azt is jelenti, hogy a kerületi pontok és a tömegközéppont sebességének változása időben azonos.

Így (12)-ből

$$(16) \quad t_1 = \frac{v_0 - r\omega_0}{2\mu g}$$

kifejezést kapjuk az időre.

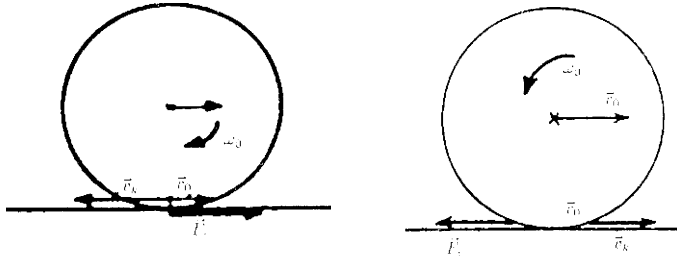
2.2. A karika azonos úton visszatérő gurítása — bumerángmozgása

Az egyenes vonalú gurítások másik nagy csoportja a karika azonos pályán visszatérő mozgása. Ezt röviden bumerángnak nevezik a ritmikus sportgimnasztikában.

Az r sugarú m tömegű karikát a talaj felett ω_0 szögsebességgel visszafelé megforgatva úgy dobja el a sportoló, hogy középpontjának sebessége az eldobás irányában \vec{v}_0 .

Vizsgáljuk meg, *milyen kezdeti feltételek mellett teljesül, hogy a karika talajra érés utáni mozgása során visszaforduljon*, illetve mekkora ω_0 szögsebességgel érhető el, hogy a visszafelé haladó karika sebessége \vec{v}_0 legyen?

A talajra érés pillanatában a karika talajjal érintkező pontjának sebessége (5) alapján: $\vec{v}_A = \vec{v}_0 + \vec{v}_k$.



4. és 5. ábra

Mivel most a transzlációs és a kerületi sebesség az A pontban azonos irányba mutat, nagyságuk összeadódik:

$$(17) \quad v_A = v_0 + r\omega_0.$$

\vec{v}_A iránya előre mutat, így a súrlódási erő hátrafelé (lásd 5. ábra). A karika a talajon csúszik. Így fellép az $F_s = \mu mg$ súrlódási erő, amely mind a haladó, mind a forgó mozgást fékezi. A mozgásegyenletek (7) és (8) alapján $m\vec{a} = \vec{F}_s$ és $\theta\vec{\beta} = \vec{M}_s$.

Így most is az $a = \mu g$ és $\beta = \frac{\mu g}{r}$ összefüggéseket kapjuk. Most viszont a súrlódási erő mindkét mozgást fékezi, így t idő múlva

$$(18) \quad v_0(t) = v_0 - \mu g t,$$

és

$$(19) \quad \omega_0(t) = \omega_0 - \mu \frac{g}{r} t,$$

ahol $v_0(t)$ a transzlációs sebesség, $\omega_0(t)$ pedig az t tengely körüli forgás szögsebessége.

A visszafordulás feltétele:

$$(20) \quad v_0(t) = 0$$

és

$$(21) \quad \omega_0(t) > 0.$$

Ez abban a t_1 időpillanatban következik be, mikor a translációs sebesség egy pillanatra 0 lesz:

$$(22) \quad v_0 - \mu g t_1 = 0, \quad \text{azaz} \quad t_1 = \frac{v_0}{\mu g}.$$

A (21) feltétel miatt (19)-be behelyettesítve:

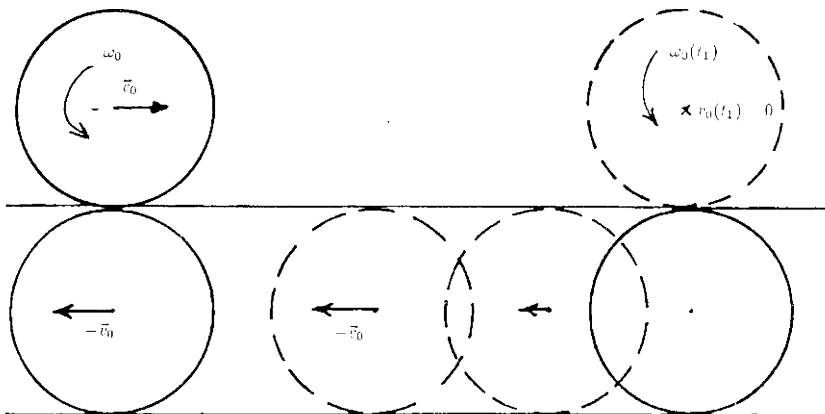
$$\omega_0(t) = \omega_0 - \mu \frac{g}{r} \frac{v_0}{\mu g} > 0.$$

Tehát

$$(23) \quad \omega_0 > \frac{v_0}{r}$$

adja a visszafordulás feltételét.

Vizsgáljuk még meg, milyen kezdeti feltételeknek kell teljesülnie ahhoz, hogy a karika ugyanakkora translációs sebességgel érjen vissza a sportolóhoz, mint amilyenel megkezdte mozgását.



6. ábra

Tételezzük fel, hogy visszafordulás után, a kezdettől mért t_2 időpillanatban jön létre a tisztán gördülés.

Ekkor (18) és (19) alapján

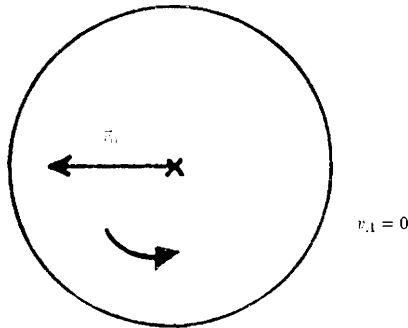
$$v_0(t_2) = v_0 - \mu g t_2,$$

ahol $\vec{v}_0(t_2)$ a transzlációs sebesség nagysága a t_2 időpillanatban, és

$$v_k(t_2) = r\omega_0 - \mu g t_2,$$

ahol $v_k(t_2)$ a kerületi sebesség nagysága a t_2 időpillanatban.

A két vektor ellentétes irányú és azonos nagyságú, így az A pont sebessége 0 (7. ábra).



7. ábra

Tehát $v_0(t_2) = v_k(t_2)$, így

$$(24) \quad \mu g t_2 - v_0 = r\omega_0 - \mu g t_2,$$

azaz

$$(25) \quad t_2 = \frac{r\omega_0 + v_0}{2\mu g}.$$

Ha azt akarjuk, hogy $v_0(t_2) = v_0$ legyen, úgy

$$v_0(t) = v_0 - \mu g \frac{r\omega_0 + v_0}{2\mu g} = \frac{v - r\omega_0}{2}$$

miatt

$$\frac{r\omega_0 - v_0}{2} = v_0.$$

Ez az $\omega_0 = 3\frac{v_0}{r}$ kezdeti feltétel teljesülését jelenti.

3. Összegzés

Ha a karika mozgását előre kívánjuk meghatározni, a kezdeti feltételeket biztosítani kell. A sportolónak fontos, hogy a gyakorlat során a karika mindig a meghatározott pályán, lehetőleg azonos ideig önállóan mozogjon. Úgy gondolom, az egzakt összefüggések ismeretében tudatosan tervezhető a kéziszer mozgása, s a felmerülő hibák kiküszöbölhetők.

A ritmikus sportgimnasztika csupán egyetlen kéziszerének — a karikának — legalapvetőbb mozgását, a talajon történő gurítását vizsgáltam. Még ennek az egyetlen szernek a mozgása is rengeteg tisztáznivalót kínál a fizikus számára. A mozgások mechanikai analízisével kapott konkrét összefüggések ismerete segítséget nyújthat a gyakorlatok tervezésekor e sportág szakembereinek.

Irodalom

- [1] ABÁDNÉ HAUZER H.: Ritmikus sportgimnasztika. Sport, Budapest, 1978.
- [2] BARABÁS A.—FÁBIÁN GY.: A testnevelés- és sporttudományos kísérletek tervezése. TF., Budapest, 1980.
- [3] BARTON J.: Biomechanika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1984.
- [4] BUDÓ Á.: Kísérleti fizika I. Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.
- [5] HORVÁTH P.—JUHÁSZ G.—TASNÁDI P.: Mindennapok fizikája. ELTE, TTK, Budapest, 1991.
- [6] NIESE, G.: Fizika a mindennapi életben. Gondolat, Budapest, 1964.
- [7] PÁRKÁNYI L.: Mechanika I. Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.
- [8] SAS E.: Beszélgetések a fizikáról. Gondolat, Budapest, 1976.
- [9] SZÉCSÉNYINÉ FEKETE I.: Ritmikus sportgimnasztika alapforgásainak biomechanikai elemzése és oktatásának néhány elvi szempontja. Budapest, TF, 1984. Doktori értekezés.
- [10] TIHANYI J.: Az erőedzés élettani és mechanikai alapelvei. Atlétika, 1985. 6. 11—16.
- [11] TOWNEND, M. S.: Mathematics is sport. Horwood Ltd. New York, 1984.
- [12] WINDELBAND, A.: Bezüge zwischen biologischen und physikalischen Erscheinungen und Besetzmäßigkeiten Physik in der Schule, 1992.

Az elektromos kapacitás, a gyökérméret és -aktivitás kapcsolata

Rajkai Kálmán¹, R. Végh Krisztina¹ és Nacsá Tibor²

¹ MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, Budapest

² N-Telekom Kft., Kiskunhalas

Abstract. Electrical capacitance for in situ detection of the root size and function. An in situ electrical measurement method for the detection of living root systems of herbaceous plants is presented. The measured root capacitance values are interpreted on a dielectric basis. The recommended series-connected root and soil capacitance model allows higher root capacitance due either to higher root capacitance or to a branching, more active root system having larger contact surface with the soil and it even allows the interpretation of the soil water content as affecting the capacitance of the soil. Root capacitance values measured on different growth stages of sunflower plants showed higher root capacitance for bigger root mass and length. Aside the needle plant electrode, a simple, non plant-wounding tweezers electrode was also studied. The measurements were carried out under controlled lab conditions on sunflower plants raised in pots with different soil water content and were then repeated after the plant was washed free of soil and placed in water. A comparison of the tweezers electrode clipped on to the stem above the root crown or the needle electrode inserted into the suction zone of the root crown showed that the root capacitance was very similar when the plants were placed in water. The deviation of the needle and tweezers electrode use increased in pot measurements as the soil water content decreased. Beside the capacitance, the phase angle was also measured for plants rooted in soil, and for a piece of root and soil separately, as a function of measuring frequency. The capacitance, and phase angle values indicated ohmic rather than capacitive character. Further investigations will be required to verify both the series-connected capacitances model and the tweezers plant electrodes in root capacitance measurements.

A növények életműködésének, különösen a gyökérzet aktuális állapotának megjelenítése ökológiai és mezőgazdasági szempontból egyaránt kiemelt jelentőségű. A gyökér mérete és aktivitása a növény tápanyag- és vízfelvétele is jellemzi. A gyökérzet közvetlen megfigyelése, növekedésének, aktivitásának tanulmányozása a szilárd, átlátszatlan talajban nagyon korlátozottan lehetséges. A legtöbb vizsgálati módszer a gyökérzetet és a növényt is roncsolja, és lehetetlenné teszi egyetlen növény folyamatos megfigyelését.

A talajmintákból meghatározott gyökértömeg, gyökéreloszlás, valamint

az élő- és holtgyökér vizsgálatok munkaigényesek, értelmezhetőségük pedig az ismeretlen reprezentativitás miatt behatárolt. A minirizotron-módszer — talajba helyezett átlátszó falú üveg- vagy műanyag csőben optikai eszközzel történő gyökérmegfigyelés —, valamint a talaj gyökérszónájából vett bolygatatlan talajminták kimosásával meghatározott gyökérsűrűség — esetenként jelentős — különbsége, a minirizotronos technika korlátaira utal (Andrén et al., 1993).

A mintavételes gyökérvizsgálatok mellett különös érdeklődés övezi azokat a vizsgálati módszereket, amelyek a növények állapotáról — az életműködés befolyásolása nélkül — szolgáltatnak folyamatos információt. Az úgynevezett monitorozó gyökérvizsgálati módszerek közé a növényt nem roncsoló, mintavétel nélküli elektromos eljárások tartoznak (pl. Campbell et al., 1962, Hyde et al., 1964, és Johns et al., 1965a,b).

A gyökérzet méretének — hossz, tömeg és átlagos átmérő —, valamint működési jellemzőinek a megfigyelésére alkalmazott elektromos méréseket (Chloupek, 1972 és 1977, valamint Dalton 1995).

Chloupek (1972) az elektromos kapacitásmérést nagyobb gyökértömegű és szárazságtűrőbb növényegyedek nemesítési célú kiválogatására alkalmazta. Megállapította, hogy a mért gyökérkapacitás-értékeket a talaj nedvességtartalma jelentősen befolyásolja. A gyökérkapacitás-mérést a gyökérszöveti membránok polarizálása érdekében 1 kHz-es, 1 V feszültségű elektromos jellel végezte. Megítélése szerint a mért kapacitásértékek a talaj és a vezetőkek kapacitásától is „szennyezettek” (Chloupek, Skácel és Ehrenbergerova, 1999).

A gyökérkapacitás és a gyökérmorfológia kapcsolatát Kendall és munkatársai elemezték (Kendall et al., 1982). A gyökérnyakba szúrt tüeelektóddal mért gyökérkapacitás-eredmények magyarázatára Dalton konceptuális modellt dolgozott ki (Dalton, 1995).

Dalton szerint a mért elektromos kapacitás leginkább az aktív gyökérfelület nagyságát jellemzi. A növényi vízfelvételt szerinte a gyökérfelület a gyökérsűrűségnél jobban jellemzi. A gyökérfelület arra is tartalmaz információt, hogy a gyökérzet mekkora hányada vesz részt a vízfelvételben (Dalton, 1995).

A kapacitásmérés gyökérvizsgálati alkalmazhatóságára végzett vizsgálatokhoz talaj- és homok keverékkel töltött tenyészedenyekben és tápoldatban nevelt növényeket alkalmaztunk. Kísérleteinkben a növényt nem sebző, különböző szárméretre és szártípusra helyezhető növényelektród kiprobálását, valamint megfelelő érzékenységgű, könnyen kezelhető, terepen is használható, olcsó kapacitásmérő készülék kiválasztását is célul tűztük ki.

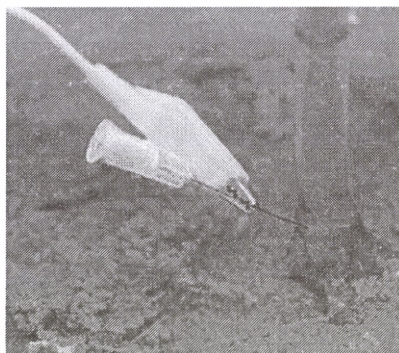
Módszertani vizsgálataink során a talajban gyökerező növény gyökérkapacitásán kívül megmértük a talaj és a gyökér (gyökérdarab) elektro-

mos kapacitását, és meghatároztuk a kapacitásértékek frekvenciafüggését is. A mérési eredmények magyarázatára az irodalomban közölttől különböző gyökérkapacitás-értelmezést dolgoztunk ki. A gyökérkapacitás mennyiségi információtartalmának megállapítása érdekében a növények gyökértömegét és gyökérhosszát is megmértük.

Tenyészedény-kísérletek

A 2 literes műanyag tenyészedényekben a napraforgókat magról virágzásig (18 leveles fejlettség) neveltük 4 rész mezősegi talaj és 1 rész mosott folyami homok keverékben, amelyek tápanyag- és nedvességtartalmát vetéskor optimális értékűre állítottuk. A napraforgókat — kontrollált hőmérsékleti és fényviszonyok között — klímakamrában, nyolc hetes korukig neveltük. A tenyészedények talaját súlyra öntözéssel, közelítőleg a szabadföldi vízkapacitás értéken tartottuk.

Mérőkészülékek és elektródok



1. kép

A napraforgó gyökérkapacitásának mérése tűelektróddal

A kapacitás- és ellenállásméréseket GW814 és HP4284A típusú induktívitas-, kapacitás- és ellenállásmérő (LCR) készülékekkel végeztük. A GW814 készülék a kapacitásmérést 1 kHz frekvencián és 1 V kapocsfeszültséggel végzi. A kapacitás és ellenállás frekvenciafüggését 30 Hz és 1 MHz között a HP4284A precíziós LCR mérőhíddal határoztuk meg, amelynek szintén 1 V a mérőfeszültsége.

Talajelektródként 6,3 mm átmérőjű és 15 cm hosszú, rozsdamentes acélszondát használtunk, amelyet kb. 10 cm mélyen szúrtunk a talajba. A talajból kiálló szondához csatlakoztattuk a mérőkészüléket. Növényelektrodként injekciós tűt (1. kép), vagy síklapban végződő rúgós fémcsipeszt alkalmaztunk, amelyhez a mérőkészülék pozitív bemenetét csatlakoztattuk.

A tüelektródot a gyökérnyak fölött a szár tengelyvonalával kb. 45° -ot bezáró szögben szúrtuk a szárba és töltük — a központi henger elérése érdekében — a szár középvonaláig. A központi henger elérését a kijelzett kapacitás meg-növekedése jelezte. A növényelektródot a gyökérnyakra csíptettük. A talaj-és növényelektród között mért kapacitást és ellenállást, kb. 15-20 másodperc beállási idő után olvastuk le.

A csipeszelektród és a szár kontaktusa, valamint a csipesz-szár érintke-zési felület növelése érdekében az EKG elektródokhoz használt, nagy veze-tőkéességű gélt (UNIGEL) alkalmaztunk (Kendall et al., 1982) úgy, hogy a csipesz felhelyezése előtt a szárat az UNIGEL-lel vékonyan körbekentük.

A gyökér tömegének és hosszának a meghatározása

A talajból frissen kimosott gyökér tömegét mértük meg. Minthogy a gyökér friss tömegét döntően a víz határozza meg, a víz sűrűsége alap-ján számított térfogat a gyökértérfogat (V) becslését teszi lehetővé. Delta-T gyökérhossz- és felületmérő videokamerás készülékkel a gyökérzet teljes hosszát (L) mértük (Webb, 1989). Az átlagos gyökérsugarat a gyökértérfogat és a gyökérhossz ismeretében az $r = (V/\pi L)^{1/2}$ összefüggéssel számítottuk ki. A gyökérfelületet (RA) sima, henger alakú gyökérzetre az $RA = 2r\pi L$ összefüggéssel a gyökérhossz alapján határoztuk meg.

Elektromos kapacitás a talaj-növény rendszerben

A kolloid rendszerekre kidolgozott elektrokémiai módszerek elmélete nemcsak a talajra, hanem a talaj-növény rendszer dielektromos tulajdonsá-gainak értelmezésére is alkalmazhatók, minthogy a növényi szövetek szintén diszperz, vizes kolloidrendszert alkotnak.

Az elektromosságtanban kapacitáson két felületen adott nagyságú elekt-romos potenciál hatására felhalmozódó töltés és feszültség hányadosát értik (Hilhorst, 1998). A kapacitás nagysága a töltéstároló felület nagyságától (A), a fegyverzetek távolságától (d) és a köztük lévő anyag dielektromos állandójától vagy permittivitásától (ε) függ.

A gyökér a talajban azonban természetesen nem ideális kondenzátor-ként viselkedik. A mérés során a talajban és a gyökérben is kialakulnak töltéstároló felületek és mobilizálható töltések. Minthogy a gyökérkapacitás mérésére 1 kHz frekvenciájú elektromos jelet alkalmaznak, a következők-ben azt tárgyaljuk, hogyan hat a talajra és a gyökérre az elektromos mező (E -mező).

A talajt alkotó szemcsék felülete negatív töltésű, amelyhez legalább egy rétegben kationok adszorbeálódnak. Az adszorbeálódott kationréteget (Stern-réteg) egy diffúz szolvátréteg övezi (pl. Stefanovits et al, 1999). A

diffúz szolvátrétegben a víz dipólus molekulái a talajrészecske felületi és az ellenionréteg töltései szerint rendeződnek. A hőmozgás eredményeként a töltéstéren kívül a vízmolekulák véletlen elrendeződésűek. A gyökérkapacitás mérésekor alkalmazott külső E -mező ezt az elrendezést olymódon változtatja meg, hogy a víz dipólusokat erővonalak mentén rendezi. Az elektromos erővonalak mentén rendeződő vízmolekulákban töltésmegoszlás alakul ki, vagyis polarizálódnak. A polarizáció következtében megváltozott töltésmegoszlású rendszerben a polarizáció mértékével arányos, mérhető elektromos áram indul. A polarizáció új egyensúlyi állapotot hoz létre, az új elrendezés a felvett energiát eltárolja. Az E -mező kikapcsolása után az eltárolt energia disszipálódik, és a rendszer az E -mező előtti állapot visszaállása irányában rendeződik. A folyamat a dielektromos relaxáció.

A gyökér elektromos kapacitásának a mérésére Chloupek a polarizáció érdekében 1 kHz frekvenciájú elektromos jelet (E -mező) alkalmazott (Chloupek, 1972). Dalton a Chloupek által alkalmazott tű növényelektrodos gyökérkapacitást a gyökér központi hengerében lévő gyökérnedv és a talajoldat közötti membránfelületeken a polarizáció következtében kialakuló töltésként értelmezte (Dalton, 1995). Dalton a gyökeret határoló membránokat szigetelőnek, a xylemnedvet és a talajoldatot pedig vezetőnek tekintette. A gyökér külső felületét a talajoldattal, mint külső vezetővel tekinti kontaktusban levőnek. A dielektromos állandót és a geometriai tényezőket változó értékűnek, de a gyökér-talaj rendszerre egységesen jellemzőnek ítéli. A gyökérnyakban mért kapacitást a talajoldattal kontaktusban lévő, vagyis aktív gyökérelemek, mint párhuzamosan kapcsolt hengerkondenzátorok összegzett értékeként értelmezi. A hengerkondenzátor kapacitása (Dalton, 1995) szerint:

$$C = \frac{\varepsilon_i A_i}{4\pi r_{i2} \ln \frac{r_{i2}}{r_{i1}}},$$

ahol C a gyökérkapacitás, A_i a henger alakú gyökér felülete ($2\pi r_{i2} L$), L a gyökérhossz, r_{i1} a xylem sugara, r_{i2} a gyökér külső, talajoldattal érintkező sugara, ε_i a gyökérszövet dielektromos állandója.

A talajnedvesség-tartalmat, a talajoldat ionösszetételét és -koncentrációját a gyökérkapacitás további meghatározó elemeiként említi Dalton (1995).

A gyökérkapacitás Dalton által adott értelmezését a kolloid rendszerekre és az élő szövetek elektromos viselkedésére vonatkozó elektrokémiai vizsgálati eredmények is alátámasztják. Ezek közül kettőt említünk:

— A talaj mint töltött kolloid részecskékből álló vizes elektrolit kis frek-

vencián (≤ 1 kHz) a dielektromos állandó értékét közelítő permittivitással rendelkezik (Schwarz, 1962).

— A lágy, élő szövetek az 1 kHz alatti frekvencia-tartományban nagy permittivitással és kis elektromos vezetőképességgel rendelkeznek (Polk és Postow, 1986). A nagy permittivitás a kolloid részecskéket körülvevő ellenionréteg polarizációja következtében minden olyan vizes rendszerben előfordulhat, ahol az érintkező felületeken ionréteg található (Schwartz, 1962).

Kis talajnedvesség-tartalom esetén az 1 kHz frekvenciájú gyökérkapacitás-mérést a víz-levegő határfelületek polarizációja hatására megnövekedő dielektromos állandó teszi lehetővé. Szabadföldi vízkapacitásig víztelített talajban a dielektromos állandó azonban már a kettősréteg-polarizáció következtében nő meg (Hilhorst, 1998).

A növényi szárra helyezett csipesz alkalmazásakor a váltakozó frekvenciájú elektromos jel ugyancsak a xylemnedv membránfelületi rétegét polarizálja. A csipeszelektróddal mérhető gyökérkapacitást tanulmányoztuk azért, hogy a csipesz- és a tűelektrod által kiváltott polarizáció gyökérkapacitásra gyakorolt hatását megállapítsuk.



2. kép

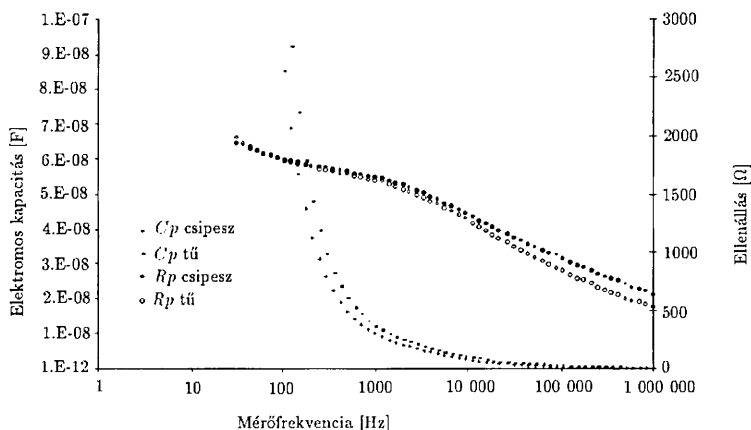
A gyökérkapacitás mérésére nevelt, különböző fejlettségi állapotú napraforgók

A növényelektrod

A gyökérkapacitás-mérések, pl. a tűelektrod központi hengerbe szúrásai bizonytalanságának csökkentésére csipeszelektrodot alkalmaztunk. A csipeszelektrod előnye továbbá, hogy a növényt nem sebz meg. Összehasonlítottuk a gyökérnyakba szúrt injekciós tűvel, és a gyökérnyak fölött az UNIGÉL-lel körbekerített szárra helyezett csipeszelektróddal ugyanazon a növényen mért kapacitásokat. Tenyészedényben nevelt napraforgón tű- és csipeszelektróddal mért kapacitás- és ellenállásértékek frekvenciafüggését az 1. ábrán mutatjuk be. Látható, hogy a kapillárisan víztelített talajban a csipeszelektróddal mért kapacitás 1 kHz-en kisebb a tűelektróddal mértéknél. A

frekvencia csökkenésével az eltérés mértéke nő, míg a frekvencia növekedésével csökken.

Tíz (3, 3 és 4 db) — azonos körülmények között, tenyészedényben nevelt — 8, 14 és 18 leveles fejlettségi állapotú napraforgón (2. kép) tanulmányoztuk a tű- és csipeszelektrodos kapacitásmérések eredményeit (2., 3. és 4. ábra). A kapillárisan víztelített és a közel szabadföldi vízkapacitású talajban (2. és 3. ábra) tű- és csipeszelektroddal mért gyökérkapacitás-értékek eltérése a talaj nedvességtartalmának csökkenésével növekedett.



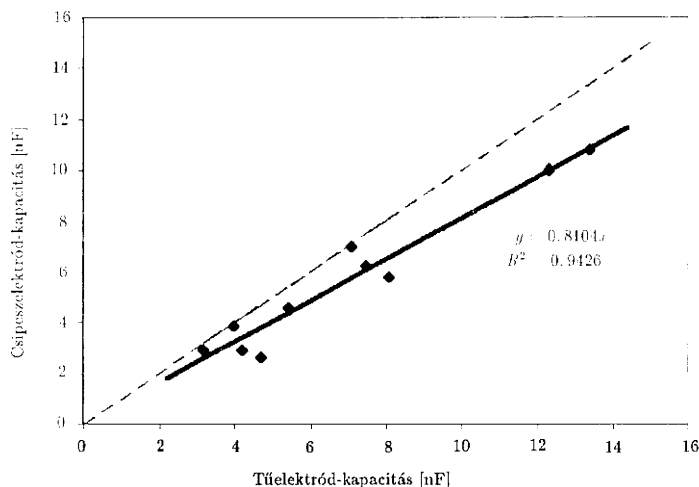
1. ábra

A napraforgógyökér HP4284A készülékkel mért kapacitása és ellenállása a frekvencia függvényében

A csipeszelektrod

A szárra helyezett csipeszelektrod és a gyökér központi szállító edényében található xylemnedv nincs közvetlen elektromos kontaktusban. Hogyan mérhető mégis a xylemnedvbe vezetett tüeelektrodéhoz hasonló kapacitás és miből adódik az eltérés? A kérdésre a választ a következőkben adjuk meg:

A szárat körülölelő, nagy vezetőképeségű gélre csíptetett elektródra vezetett E -mező a szárszövetek és így a központi szállítószövet sejtmembránjainak felületén található dipólusokat polarizálja. A polarizáció mértéke azonban a xylemnedvbe szűrt tüeelektroddal kiváltott polarizációnál kisebb, mert a szárra kent gélből a központi hengert polarizáló E -mező energiája a közbenső szárszövetek polarizációja következtében csökken. A központi hengert elérő E -mező membránfelületet polarizáló energiája tehát kisebb, mint a xylemnedvvel közvetlen kontaktusban lévő tüeelektrod esetében. Valószínű, hogy az E -mező energiavesztése növényfajonként és egyedfejlődési fázisonként is eltérő.



2. ábra

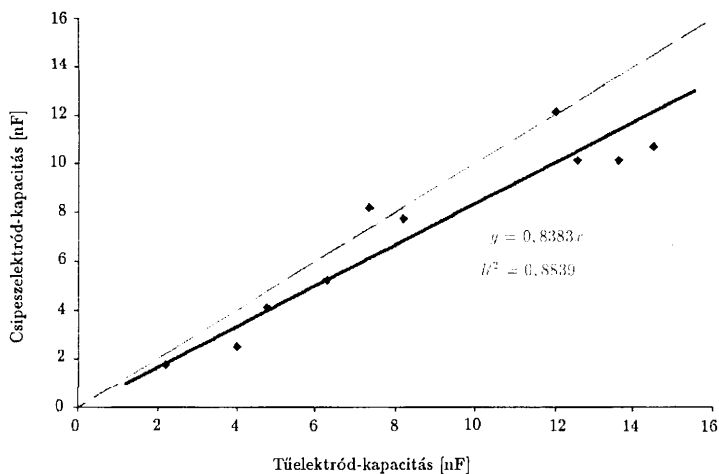
Napraforgó tű- és csipeszelektroddal

1 kHz frekvencián, közel víztelített talajban mért gyökérkapacitása

Mérési tapasztalataink szerint a tüelektrod helyett az UNIGÉL és a csipeszelektrod alkalmazása a vízkultúrába helyezett növények gyökérkapacitásának mérésekor hibahatáron belül közel azonos eredményű (4. ábra). A csipeszelektrod oldatkultúrán kívüli alkalmazhatósága azonban további vizsgálatokat tesz szükségessé. A vizsgálatok többek között a gyökérkapacitás talajnedvesség-tartalom függésének megállapítása miatt szükségesek.

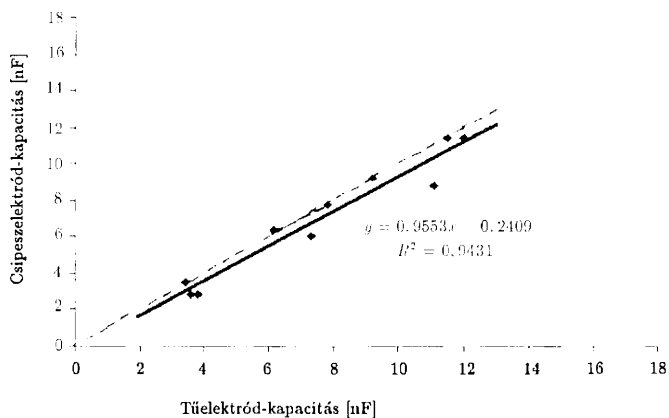
A gyökérkapacitás értelmezése

A növény- és a talajelektroddal végzett mérés egy biológiai membránhálózat — a gyökérrendszer —, valamint a talajrészecskéket bevonó talajoldatmembrán polarizációja következtében mérhető komplex impedanciát, és azzal összefüggő kapacitást fejez ki. A mért kapacitást a gyökérben és a talajrészecskéken polarizált membránfelületeken mint fegyverzeteken felhalmozódó, adott feszültségű töltés alakítja ki. A polarizáció következtében kialakuló, elektromosan vezető gyökér- és a talajmembránok — „fegyverzetek” — között két különböző dielektrikum — a gyökérszövet és a talaj — helyezkedik el. Az 5. ábrán vázolt elrendezésben a talaj-gyökér rendszer elektromos helyettesítő képe egy olyan kondenzátor, amelynek a fegyverzetei között két, különböző permittivitású dielektrikum található. A két dielektrikumú kondenzátor kapacitása két sorba kötött kondenzátor kapacitásként írható fel (Budó, 1972). A két dielektrikumú kondenzátor eredő kapacitása a kisebb kapacitású kondenzátor kapacitását közelíti.



3. ábra

Napraforgógyökér tű- és csipeszelektróddal
1 kHz frekvencián, szabadföldi vízkapacitású talajban mért kapacitása



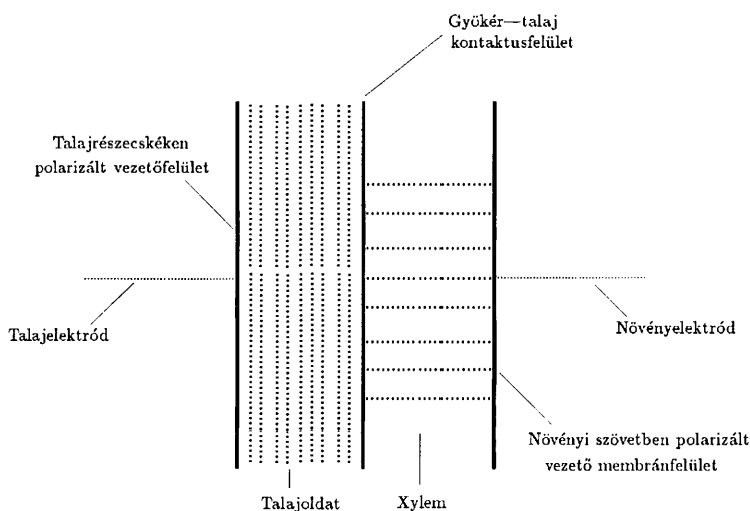
4. ábra

Napraforgógyökér tű- és csipeszelektróddal
1 kHz frekvencián, vízkultúrában mért kapacitása

A 5. ábrán látható helyettesítő kép a gyökérkapacitás-mérési eredmények — alábbiakban megadott — értelmezését teszi lehetővé:

A kapacitás és az impedancia frekvenciafüggését a HP4284A mérőhíddal a talajra két talajelektród, a talajban lévő gyökerre tüelektród és talajelektród (6. ábra), és a napraforgó gyökerébe szúrt két tüelektród között mértük (7. ábra). A napraforgó gyökérimpedanciája és fázisszöge a dielektromos veszteség dominanciáját mutatja 1 kHz-en (6. ábra).

A talajból kimosott gyökérdarabon mért impedancia 1 kHz-en (7. ábra) a talajénak (6. ábra) közel a négyszerese. A fázisszög alapján a talajban lévő gyökér és a talaj kapacitív jellege 1 kHz-en minimális (6. ábra). A talajból kimosott gyökér fázisszöge 1 kHz-en mintegy ötszöröse a talajénak, és kétszerese a talajban mért gyökérének.

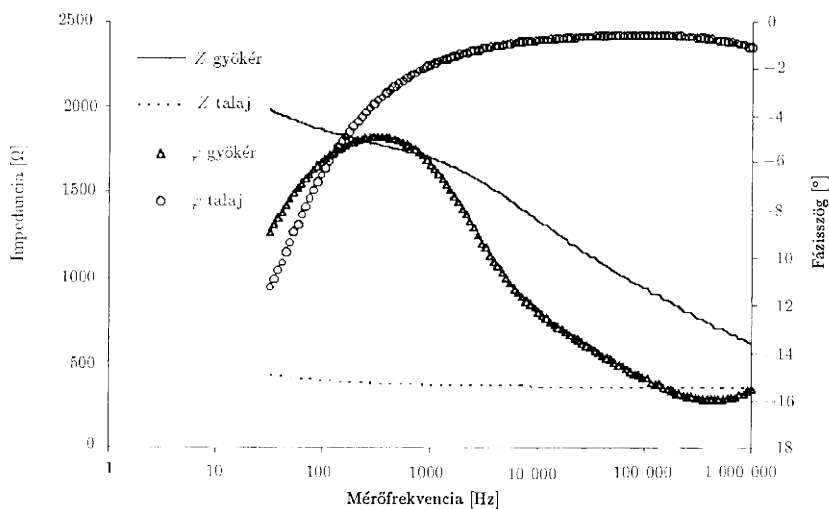


5. ábra

Kondenzátorként értelmezett, 1 kHz-en mért talaj-gyökér rendszer vázlata

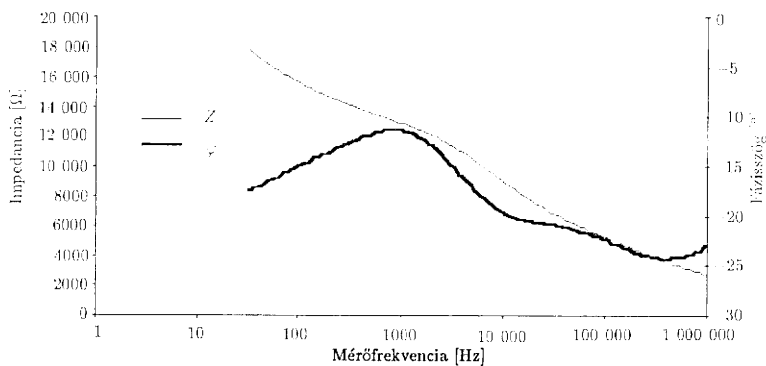
Az 1. ábrán látható, hogy a napraforgógyökér kapacitása a talajban az 1 kHz-nél nagyobb frekvenciákon folyamatosan csökken, az alacsonyabb frekvenciákon pedig nő. Ennek eredményeként alkalmazzák a gyökérkapacitás mérésére az 1 kHz frekvenciát.

A két-dielektrikumú kondenzátor helyettesítő képéből következik, hogy a gyökérkapacitást a gyökér kisebb (az 1. ábra alapján 10^{-8} F) és a talaj nagyobb (a 6. ábrán 10^{-5} F) kapacitása alakítja ki. A kapacitás a kondenzátorfegyverzetek és a dielektrikumok felületének a nagyságától is függ. Ideális kondenzátor esetében a fegyverzetek és a dielektrikumok felülete azonos. A talaj-gyökér kapacitás mérésekor viszont a fegyverzetek és a dielektrikumok felületének a nagysága talaj- és növényfüggő. A gyökérben polarizált „növénykondenzátor”-fegyverzet nagysága a növény élettani és a gyökér fej-



6. ábra

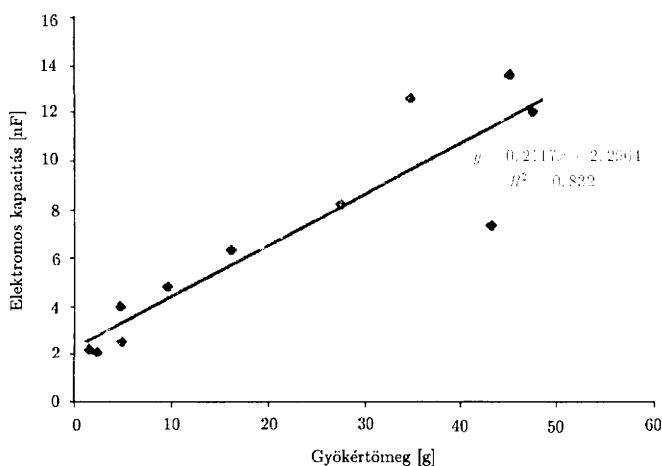
A talaj és a gyökér HP4284A készülékkel mért impedanciája és fázisszöge a mérőfrekvencia függvényében



7. ábra

Napraforgó gyökérdarab HP4284A készülékkel mért komplex impedanciája és fázisszöge a mérőfrekvencia függvényében

lettségi állapotának a függvénye. Az 5. ábra segítségével a gyökérkapacitás talajnedvesség-tartalomtól való függése értelmezhető. A talajban polarizált membránfelület — a „talajkondenzátor”-fegyverzet — nagysága ugyanis a talaj nedvességtartalmának a függvénye. A gyökér és a talajdielektrikumok közös, érintkező felülete szintén a gyökérméret és a gyökéraktivitás függvénye. A gyökér és a talajkapacitások sorba kapcsoltsága azért valószínű, mert a gyökérkapacitás a növényi gyökér kapacitását közelíti. A dielektrikumfelület nagysága a növényi fejlődés és az élettani aktivitás gyökérkapacitásában betöltött szerepével hozható összefüggésbe. Nagyobb tömegű és hosszabb gyökér ugyanis a talajjal több „ponton”, nagyobb felületen kapcsolódik, a nagyobb dielektrikumfelület pedig a gyökérkapacitást növeli.



8. ábra

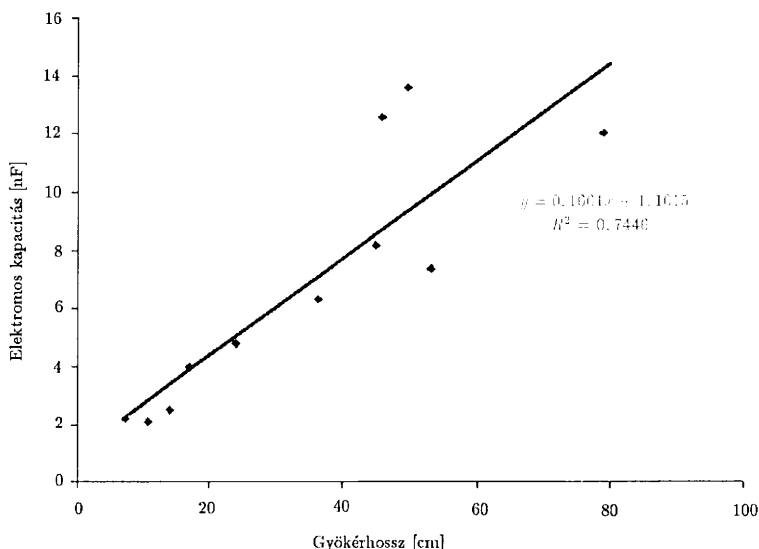
Tenyészedényben nevelt, különböző fejlettségi állapotú napraforgók gyökértömege és tüelektróddal, 1 kHz-en mért kapacitása

Gyökérkapacitás-mérési tapasztalatok

A tenyészedényben nevelt napraforgók gyökérkapacitását a növények egyedfejlődése során mértük és — a gyökértömeg és méret növekedésével összhangban — a kapacitás értékek növekedését figyeltük meg, ahogy az a tüelektrodos mérési eredményeket bemutató 8. és 9. ábrákon látható.

A tenyészedény-kísérletben kapott eredmények azonban — a kapacitás-mérés értelmezésekor felsorolt növény- és talajjellemzőktől való soktényezős függés következtében — nem vihetők át közvetlenül szabadföldi viszonyokra. Ebből következik, hogy a laboratóriumban mért gyökérkapacitás-értékek azt igazolják, hogy azok a gyökértömeget és a gyökérhosszat jól jellemzik. A ka-

pacitásérték és a gyökérjellemzők mennyiségi kapcsolata azonban csupán kalibrálást követően alkalmazható más növényre vagy mérési feltételre.



9. ábra

Tenyészedényben nevelt különböző fejlettségi állapotú napraforgók gyökérhossza és tüelektróddal, 1 kHz-en mért kapacitása

Szabadföldön a gyökérkapacitás-mérés módszertana még nincs kellően kidolgozva. A tenyészedényes és a vízkultúrák, vagyis nem szélsőséges feltételek között a gyökérkapacitás egyértelműen a gyökérműködés és a gyökérfejlődés aktuális állapotát jelzi. A kísérleti mérések a gyökér tömegének és hosszának a növekedésével növekvő gyökérkapacitást mutattak. Tápoldatban nevelt növények gyökérfejllettsége és a mért kapacitása közvetlenül megfigyelhető volt. A növénytömeg a kapacitásmérést követően közvetlenül lemérhető, és a növényt a tápoldatba visszatéve a kísérlet folytatható. A tápoldatos vizsgálatok egyik hasznosítható eredményét a következő megfigyelés jelentette: ideális fény-, hő-, víz- és tápanyagviszonyok között kalászoslagisg felnevelt búzának a 8. hét után nem volt mérhető értékű gyökérkapacitása. Valószínű, hogy ezt a növények aktív működésének, így víz- és tápanyagfelvételének a leállása idézte elő. Értelmezésünk szerint megszűnt a tápoldat és a gyökérdielektrikum közötti aktív felület. A nulla közös dielektrikum-felület miatt nem jött létre a tápoldat- és gyökérkapacitások sorba kapcsoltsága, és ezért nem volt mérhető gyökérkapacitás annak ellenére, hogy kifejllett, nagy gyökértömegű növényt mértünk. Hasonló tapasztaltunk volt szabadföldön homokpusztai magyar csenkesz (*Festuca vaginata*) növények-

kel. A gyökérkapacitás-mérést augusztusban végeztük, amikor a csenkeszek termésérését követő, vegetáló állapotúak. A homoki növényállományban a csenkeszeknek nem volt mérhető gyökérkapacitása. Annak a lehetőségnek a kizárására, hogy kapacitást a légszáraz homoktalaj miatt nem mértünk, a csenkesz töve körül a talajt megöntöztük. Öntözés után kb. 20 perccel a gyökérkapacitás-mérést megismételtük. Mérhető gyökérkapacitás azonban továbbra sem jelent meg. A tápoldatos kísérletben tapasztalt jelenség tehát szabadföldi körülmények között fordult elő. Az eredményt az élő magyar csenkesz nyári, száraz időszakban jellemző inaktív, „alvó” állapotával magyaráztuk, ami a gyökérműködés leállását jelenti. A terepi mérési tapasztalat a gyökérkapacitás-mérés ökológiai alkalmazhatóságára, illetve az abban rejlő lehetőségekre hívja fel a figyelmet.

A gyökérkapacitás mérésének mezőgazdasági jelentősége a gazdasági növények fejlődésének folyamatos megfigyelésében jelölhető meg. A mérési módszer segítségével várhatóan a tápanyaghiány-tünetek, a növényvédőszer- és a nehézfémhatások eddig nem vizsgált mechanizmusai, valamint a környezeti tényezők gyökérzetre, illetve a növényi aktivitásra kifejtett hatásai tárhatók fel. A gyökérkapacitás-mérés gyakorlati alkalmazásáig azonban még további vizsgálatok és tapasztalatgyűjtés szükséges.

Összefoglalás és következtetések

Az élő gyökér vizsgálatára az ökoфизиologiában és a mezőgazdasági gyakorlatban új lehetőségeket nyújtó elektromos mérési módszert alkalmaztunk. A gyökérkapacitás mérési elvét a talaj-gyökér rendszerre kidolgozott helyettesítő képre értelmeztük. A növényt nem sebző, egyszerű és megbízható növényelektrodot kerestünk. Új növényelektrodként az elektromosan vezető géllel bekent gyökérnyak fölött a szárra csíptetett, lapos végű fémcsipeszt alkalmaztunk. A csipesz- és a talajelektrod által közvetített elektromos tér a növényyszöveti membránokat és a talajrészecskéket bevonó oldatfilmet polarizálja. A gyökérkapacitás méréseket tenyészedényben és tápoldatban nevelt napraforgókon végeztük. Azt tapasztaltuk, hogy vízkultúrában a csipesz- és a tüelektroddal mért gyökérkapacitás közel azonos, míg talajban az eltérés mértéke a nedvességtartalom csökkenésével növekedett. Megállapítottuk, hogy:

- a csipeszelektrod alkalmazása további vizsgálatokat tesz szükségessé;
- a gyökérkapacitás a kétdielektrikumú kondenzátor modellben a gyökérszöveti membránt bevonó xylemnedv és a talajrészecskék felületét bevonó talajoldat dielektrikumok „érintkező” felületének, valamint a gyökérben és a talajban polarizált membrán felületének a nagysága és az azokon felhalmozódó töltésmennyiség által meghatározott; a GW814 kereskedelmi forga-

lomban beszerezhető, egyszerű és olcsó kapacitásmérő készülék megfelelő a gyökérkapacitás mérésére.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott munka anyagi támogatását az T022087 számú OTKA kutatás biztosította, amelyért a szerzők köszönetüket fejezik ki.

Irodalom

- [1] ANRÉN O., HANSON A-C., VÉGH K. R. 1993. Barley root growth and nutrient uptake from two soil types in rhizotron with vertical and horizontal minirhizotrons. *Swedish J. Agric. Res.* 23, 115—126.
- [2] BUDÓ Á. 1972. Kísérleti fizika II. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- [3] CAMPBELL A. G., PHILLIPS D. S. M., O'REILLY E. D. 1962. An electronic instrument for pasture yield estimation. *Journal of the British Grassland Society* 17, 89—100.
- [4] CHLOUPEK, O., SKÁCEL, M., EHRENBERGOVA, J. 1999. Effect of divergent selection for root size in field-grow alfalfa. *Canadian J. of Plant Sci.*, 79, 93—95.
- [5] CHLOUPEK, O. 1972. The Relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots. *Biologia plantarum* 14, 227—230.
- [6] CHLOUPEK, O. 1977. Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance. *Plant and Soil*, 48, 525—532.
- [7] DALTON, F. N. 1995. In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods. *Plant and Soil* 173: 157—165.
- [8] HILHORST, M. A. 1998 Dielectric characterisation of soil. Doctoral Thesis, Wageningen Agric. Univ. pp. 141.
- [9] HYDE, F. J, LAWRENCE, J. T. 1964. Electronic Assessment of pasture growth. *Electronic engineering*: 666—670.
- [10] JOHNS, G. G., NICOL, G. R., WATKIN, B. R. 1965. A modified capacitance probe technique for estimating pasture yield. I. Construction and procedure for use in the field. *Journal of the British Grassland Society* 20, 212—217.
- [11] JOHNS, G. G., NICOL, G. R., WATKIN, B. R. 1965. A modified capacitance probe technique for estimating pasture yield. II. The effect of different pastures, soil types and dew on the calibration. *Journal of the British Grassland Society* 20, 217—226.
- [12] KENDALL, W. A., PEDERSON, G. A., HILL, R. R. 1982. Root size estimates of red clover and alfalfa based on electrical capacitance and root diameter measurements. *Grass and Forage Science* 37, 253—256.

- [13] POLK, C., POSTOW, E. (eds.) 1986 Handbook of biological effects of electromagnetic fields. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida. pp. 56—57.
- [14] SCHWARZ, G. 1962. A theory of the low frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution. J. Phys, Chem., 66, 26—36.
- [15] Trase System1 Operating Instructions, Soil Moisture Corp., 1990.
- [16] STEFANOVITS P, FILEP GY, FÜLEKY GY. 1999. Talajtan. Mezőgazda, Budapest.
- [17] WEBB, N. (ed.) 1989. Root length measurement with the Area Meter Mark 2 using computer software Root Version 3, Delta-T Devices LTD.

Felszín alatti víztartók elektromos formatényezője és hidrogeológiai paraméterei

Ujfaludi László

EKF Fizika Tanszék

Abstract. Electrical formation factor and the hydrogeological parameters of aquifers. Relationship between electrical formation (F_a) factor and hydraulic conductivity of aquifers (K) has extensively been studied since the 1960s. On the basis of a great number of laboratory and field tests it can be stated that: (i) the $K=f(F_a)$ function is not a unique one and, additionally it may have a variable (ascending or descending) trend; (ii) within a well defined hydrogeological formation the empirical relationship between F_a and K is a unique function and it can reliably be used for the estimation of K values. A detailed analysis—based on literature and own laboratory tests—proved that the $K=f(F_a)$ and the $K=f(n)$ functions (where n is the porosity) exhibit an opposing trend: if any of them is increasing the other is decreasing and vice versa. Analysis of Pfannkuch's model and the classical Kozeny–Carman model proved that this is simply a consequence of the mathematical formulation of the above models. Using this specific relationship fine structure of aquifer materials can be determined from the field data of F_a and K .

Bevezetés

A vízzel telített szemcsés kőzetekben lejátszódó áramlásos (advektív) tömegtranszport az elektromos töltéstranszport jelenségeivel sok rokon vonást mutat. A jelenségek között fennálló analógia a leíró egyenletek matematikai hasonlóságában is szembetűnő (Bear, 1972).

A talajvízmozgások alapegyenlete a Darcy-törvény:

$$(1) \quad \mathbf{v} = -K \operatorname{grad} h,$$

ahol \mathbf{v} az áramlás középsebessége, K a szivárgási tényező, h a piezometrikus nyomás.

A pórusokban történő áramvezetésre az Ohm-törvény differenciális alakja érvényes:

$$(2) \quad \mathbf{i} = -k \operatorname{grad} U,$$

ahol i az elektromos áramsűrűség, k a fajlagos elektromos vezetőképesség, U az elektromos potenciál.

A felismert analógia két irányban is ösztönzőleg hatott. Az ún. elektromos analóg modellek Pavlovskij munkássága nyomán (Bear, 1972) legalább ötven évig a talajvíz-modellezés leghatékonyabb eszközei voltak. Másrészt az 1960-as évektől foglalkozni kezdtek a felszín alatti víztartókban lejátszódó különböző transzportfolyamatok kapcsolataival. Ennek gyakorlati hangsúlyt ad az a lehetőség, hogy viszonylag olcsó eljárásokkal olyan fontos paramétereket határozhatnak meg, amelyek hagyományos mérési módszerei költségesek. Például: olcsó felszíni elektromos szondázással következtetni lehetne a felszín alatti víztartó rétegek szivárgási tényezőjére, amelynek hagyományos módon (pl. próbaszivattyúzással) történő meghatározása igen költséges.

Az (1) Darcy-törvényben szereplő K szivárgási tényező meghatározása általában kísérleti úton történik: laboratóriumban a helyszínről vett minták átáramoltatásos vizsgálata, terepen próbaszivattyúzások útján. A K értékét laza, szemcsés kőzetekre becsülhetjük a talajfizikai adatok alapján is, a Kozeny—Carman-egyenlet segítségével (Kovács, 1972, Bear, 1972):

$$(3) \quad K = c_0 T \frac{g}{\nu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{D_h^2}{\alpha^2},$$

ahol c_0 empirikus állandó, T az ún. tortuozitás (zegzugosság), g a gravitációs gyorsulás, ν a folyadék kinematikai viszkozitása, n a minta hézagtérfogata, D_h a minta hatékony szemcseátmérője, α a szemcsék alak tényezője. A tortuozitás definíció szerint:

$$(4) \quad T = \left(\frac{l}{l'} \right)^2 < 1,$$

ahol l a minta hossza, l' az áramlási pályák átlagos hossza a szemcsék között.

A szemcsés anyag fajlagos felülete (az egységnyi térfogatú mintában lévő szemcsék összes felülete) kétféleképpen számítható ki:

(a) a kísérletesen meghatározott szivárgási tényező alapján:

$$(5) \quad S_p = \sqrt{c_0 T \frac{n^3 g}{K \nu}},$$

(b) a talajfizikai adatok alapján:

$$(6) \quad S_p = (1 - n) \frac{\alpha}{D_h}.$$

Az elektromos vezetés ugyanabban a pórusrendszerben történik, mint az áramlás. Az áramlás általában a teljes póruskeresztmetszetre kiterjed; ugyanígy az elektromos vezetés is, ha a pórusfolyadék elektromos vezetőképessége nagy. Kis vezetőképességű (nagy ellenállású) pórusvíz esetén azonban az áramvezetés a szemcsék vékony felületi rétegére korlátozódik. Ennek az ún. felületi vezetésnek a magyarázata az, hogy a folyadékokban elhelyezkedő szilárd szemcsék — víz, ill. ásványi közet szemcsék esetén — negatív felületi töltéssel bírnak. Emiatt az ellentétes töltésű ionok a szemcsék felületének közelében koncentrálódnak, tehát egy felületi kettősréteg alakul ki. Ennek közvetett hatásaként a folyadékokban szabad töltések jönnek létre, amelyek elektromos tér hatására mozgásba jönnek (az elektrooszmózis és az elektroforézis esetén), vagy a szilárd-, ill. a folyadékfázis relatív elmozdulásakor maguk létesítenek elektromos teret (az áramlási és az ülepedési potenciál esetén).

A jelenségkör kvantitatív elemzésével a kettősréteg különböző elméletei foglalkoznak. A Helmholtz-féle elmélet merev, kötött kettősréteget tételezett fel; a korszerű elméletek (Gouy—Chapman—Stern) már mozgékony, diffúz kettősréteget vizsgálnak (Shaw, 1986).

2. Összefüggések keresése

Az első jelentős kísérletet a szemcsés kőzetek elektromos és hidraulikai jellemzői közötti kapcsolat feltárására Archie tette. Empirikus egyenlete (Archie, 1942) nagy sótartalmú, vízzel telített szemcsés kőzetek F elektromos formatényezője és n hézagterfogatja között az alábbi összefüggést adja meg:

$$(7) \quad F = an^{-m},$$

ahol a a pórusgeometriára jellemző tényező (laza, szemcsés kőzetekre $a \approx 1$), m a cementáltsági tényező ($m = 1,8-2,0$ konszolidált üledékekre, $m = 1,3$ laza üledékes kőzetekre).

Az elektromos formatényező (F) definíciója Archie (1942) szerint:

$$(8) \quad F_a = \frac{\rho_a}{\rho_f},$$

ahol ρ_a és ρ_f a folyadékkal telített kőzetminta, ill. a kitöltő folyadék fajlagos elektromos ellenállása. (Az a index jelentése: apparent = látszólagos.) A minta ún. belső (intrinsic) formatényezője:

$$(8a) \quad F_i = \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)_{\rho_f \rightarrow 0}$$

Ez utóbbi akkor áll elő, ha a közenszemcsék pórusait igen nagy vezetőképességű (kis ellenállású) folyadék tölti ki. A két alaktényező közötti különbség oka nyilvánvalóan a felületi vezetés, amely kis vezetőképességű pórusfolyadék esetén jelentős.

A belső formatényező, valamint a hézagterfogat és a tortuozitás között Cornell és Katz (in: Pfannkuch, 1969) összefüggése érvényes:

$$(9) \quad F_i = \frac{1}{nT}.$$

Pfannkuch a felületi és a térfogati vezetés leírására fizikai alapokon nyugvó modellt dolgozott ki, amelynek feltételezése szerint a folyadékkal (elektrolittal) telített szemcsés közegben lévő három különböző típusú elektromos ellenállás: a folyadék ellenállása (R_f), a szilárd szemcsék ellenállása (R_{sz}) és a határfelületi réteg ellenállása (R_s) egymással párhuzamosan kapcsolódik (Pfannkuch, 1969), és az eredő ellenállás a párhuzamos ellenállások kapcsolásának szabálya szerint:

$$(10) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_{sz}} + \frac{1}{R_s}.$$

A modell másik alapfeltevése, hogy a belső formatényező, valamint a hézagterfogat és a tortuozitás között Cornell és Katz (1953) már idézett összefüggése érvényes.

A fentiekből kiindulva és felhasználva a szemcsés közeg elektromos vezetésére korábban más szerzők által kifejlesztett elméleti modelleket, az alaktényezők, valamint az elektromos és hidraulikai paraméterek kapcsolatára Pfannkuch az alábbi egyenletet vezette le:

$$(11) \quad F_a = \frac{F_i}{1 + \frac{k_{sz}}{k_f} \frac{1-n}{n} \left(\frac{l'}{l_{sz}} \right)^2 + \frac{k_s}{k_f} S_p},$$

ahol l' az áramnak a folyadékon keresztül haladó (zegzugos) úthossza, l_{sz} a szilárd szemcséken áthaladó áram úthossza, k_f , k_{sz} és k_s a megfelelő fajlagos vezetőképességek, a többi jelölés megegyezik a korábbiakkal. (A modell részletes ismertetését ld. Ujfaludi, 2000.) A (11) egyenlet nevezőjének második tagja a szilárd szemcsék, a harmadik tagja a felületi réteg vezetését fejezi ki. Ha a szilárd szemcsék anyaga tökéletes szigetelőnek tekinthető, vagyis $k_{sz} = 0$, akkor az egyenlet az alábbi, egyszerűbb alakban írható:

$$(12) \quad F_a = \frac{K_i}{1 + \frac{k_s}{k_f} S_p}.$$

Az S_p fajlagos felület kifejezhető, ha az összes többi paraméter ismert; ekkor a K szivárgási tényező az (5) vagy (6) egyenlet alapján kiszámítható. Kulcsparaméter a k_s felületi vezetés, amelynek kiszámításához Pfannkuch Bikerman egyenletét ajánlja, amelyben gyakorlati esetekben jórészt ismeretlen vagy nehezen meghatározható paraméterek szerepelnek (részletesen ld. Ujfaludi, 2000).

3. Terepi empirikus kapcsolatok

Alger (1966) elsők között vizsgálta szemcsés anyagú víztartókban az elektromos formatényezők és a szivárgási tényező kapcsolatát, furatok karotázs méréseinek eredményeit felhasználva.

Kelly (1977) glaciális víztartók vizsgálata során felszíni elektromos szondázás és próbaszivattyúzások eredményei alapján vizsgálta a $K = f(F)$ függvénykapcsolatot, és növekvő trendet állapított meg.

Mazanc és Landa (1979) a korábbi Csehszlovákiában szemcsés víztartókban próbaszivattyúzások és felszíni elektromos szondázás alapján a $K = f(F)$ kapcsolatra csökkenő trendet tapasztalt. Hasonló eredményre jutott Heigold (1979) glaciális eredetű szemcsés víztartó rétegekben próbaszivattyúzások és felszíni elektromos szondázás eredményei alapján. Empirikus formulája:

$$(13) \quad K = AF^B,$$

ahol A és B állandó (B negatív). Az általa vizsgált víztartóban a pórusvíz fajlagos ellenállása állandó volt, ezért az F formatényező helyett elegendő volt a ρ_a látszólagos fajlagos ellenállás figyelembevétele, ezzel a fenti egyenlet:

$$(14) \quad K = A_1 \rho_a^B.$$

Urish (1981) átfogó vizsgálataiban terepi és laboratóriumi mérések eredményét dolgozza fel és értékeli. Glaciális eredetű víztartók elektromos és hidraulikai paramétereit vizsgálta próbaszivattyúzási és felszíni elektromos szondázási adatok alapján. Ezen kívül laboratóriumi vizsgálatokat is végzett olyan homokmintákkal, amelyekben növekvő szivárgási tényezőhöz csökkenő hézagterfogat tartozott. (Urish tanulmányában Kézdi könyvét idézi, akinek geostatisztikai vizsgálatai szerint a felszín alatti víztartók jelentős részében ez a trend érvényesül). A tanulmány több értékes megállapítást tartalmaz, ezek a következők:

— A $K = f(F)$ kapcsolatról azonos hézagterfogatú minták esetén — saját és mások tapasztalati alapján — megállapítja, hogy az „gyenge”, vagyis a szivárgási tényező több nagyságrend változása esetén is a formatényező csak kis mértékben változik.

— Ugyanakkor vizsgálatai szerint a $K = f(F)$ kapcsolat érzékeny a hézagterfogat változásaira. Azoknál a mintáknál, ahol növekvő K értékhez csökkenő n értékek tartoztak, a fenti függvénykapcsolat markánsan növekvő trendet mutatott.

— Terepi mérései alapján megállapítja, hogy a $K = f(F)$ kapcsolat megbízhatóan csak egy geológiai egységes régió különböző helyszíneinek kvalitatív összehasonlítására alkalmas. Vagyis egy adott területre érvényes empirikus kapcsolat nem vihető át változtatás nélkül egy másik területre.

Gálfí és Liebe (1981) nagyszámú terepi fúrólyuk szondázásának eredményei alapján empirikus kapcsolatot állapított meg a vízadó rétegek ρ_a látszólagos fajlagos ellenállása, valamint szivárgási tényezője, ill. transzmisszibilitása között. Több mint kétszáz kút figyelembevételével a következő empirikus összefüggést állapították meg a szivárgási tényezők és a fajlagos elektromos ellenállások között:

$$\log K = 2 \log \rho - 7,03$$

ahol ρ értéke Ωm -ben értendő, K értékét m/s -ban kapjuk. A fenti egyenlet Heigold (13) egyenletéhez hasonló formába átírható, a kapott trend azonban itt növekvő. (Megjegyezzük, hogy a fenti empirikus egyenlet egy nagy szórású adathalmaz kiegyenlítő függvénye.)

Nagyistók (1982) számos megjegyzést fűzött Gálfí és Liebe fenti tanulmányához. Felhívja a figyelmet arra, hogy a hidraulikai és elektromos paraméterek kapcsolatának megállapításakor figyelembe kell venni a pórusvíz

kémiai összetételét, ez gyakorlatilag a ρ_f fajlagos ellenállás figyelembevételét jelenti. A hivatkozott Gálfi—Liebe cikkben nincs konkrét utalás arra, hogy a pórufolyadék fajlagos ellenállása állandó lett volna, ami indokolná, a (13) helyett a (14) típusú egyenlet használatát. Nagyistók tanulmányában számos dél-alföldi példát említ, ahol az említett feltétel nem teljesül.

Kosinsky és Kelly (1981) glaciális eredetű víztartókat vizsgált felszíni elektromos szondázással, a kapott formatényezőket a szivárgási tényezőkkel összevetve, markánsan növekvő $K = f(F)$ kapcsolatot kapott.

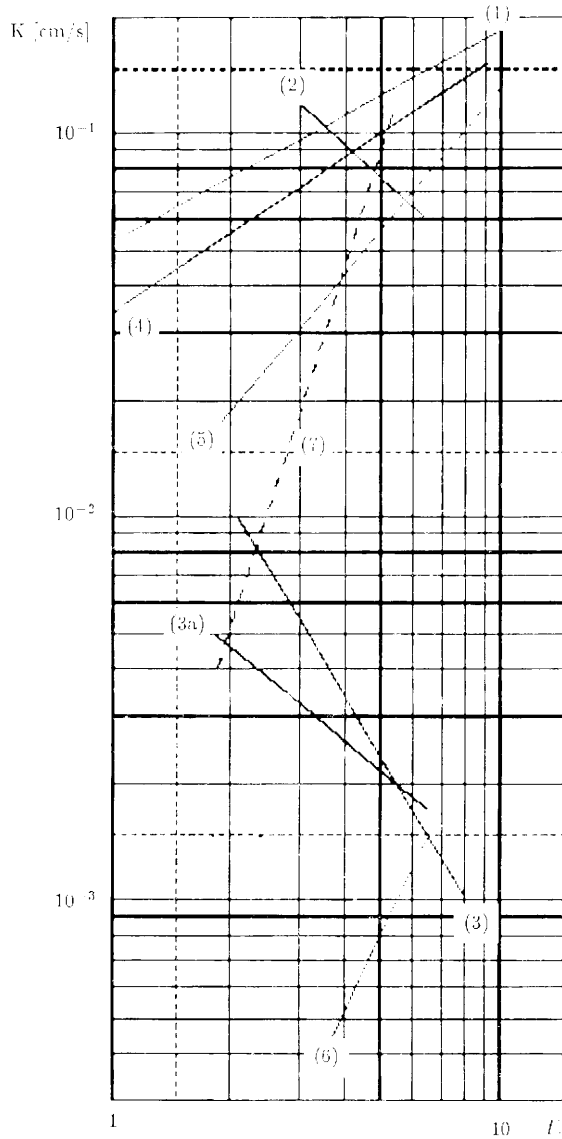
Mazavc és munkatársai (1985) részletesen elemzik az elektromos és hidraulikai kapcsolatra kapott addigi eredményeket. Megállapítják, hogy (szemcsés anyagú víztartók esetén) a kapcsolat jellegét a közettípus, a szemcseméret-eloszlás és a hézagterefogat egyaránt befolyásolja. A cikkben a szerzők idézik Shackley és Garber 1953-ban a Mississippi-völgyben alluviális homokmintákon végzett kísérleti eredményeit. Az idézett szerzők markánsan növekvő $F = f(K)$ kapcsolatot észleltek, míg a minták növekvő K értékeihez csökkenő n értékek tartoztak. A $K = f(F)$ kapcsolat komplex jellegénél fogva a kapott eredmények mindig helyspecifikusak, ezért mindig szükség van helyszíni kalibrációra. Az agyag jelenléte alapvetően módosítja a viszonyokat, ezért a szerzők külön foglalkoznak annak hatásával.

Kwader (1985) fúrólyukak elektromos szondázása alapján vizsgált $F_a = f(K)$ kapcsolatokat különböző geológiai eredetű víztartó rétegekben. A vizsgált esetekben növekvő K értékek esetén növekvő formatényező értékeket kapott és a korreláció elég szoros volt. A növekvő trendet érvényesnek találta a víztartók széles tartományában: laza szemcsés üledékekben, harmadkori karbonátos víztartókban stb. Általában markáns trendeket tapasztalt szemcsés anyagú (homok, dolomit) víztartókra, de nem volt megbízható trend repedezett, karsztos mészkövekre. Fontos tapasztalata, hogy pl. karbonátos kőzetekben alacsony fajlagos ellenállású ($\approx 0,3 \Omega\text{m}$) pórúsvizekre is érvényes trendeket talált, de ugyanígy magas fajlagos ellenállású ($\approx 100 \Omega\text{m}$ pórúsvizekre is. Megállapítja, hogy a pórúsvíz nagy vezetőképessége esetén a formatényező számítására megbízhatóan alkalmazható a (7) Archie-egyenlet.

A fent idézett közlemények empirikus $K = f(F)$ kapcsolatait az 1. ábrán foglaljuk össze.

Huntley (1986) rámutat az elektromos szondázás alapján történő K -meghatározás előnyeire: ugyanannyi idő alatt, amíg egy hagyományos próbaszivattyúzás elvégezhető, tíz elektromos szondázást lehet elvégezni. Különböző homokmintákon laboratóriumi vizsgálatokat végzett (K -mérés és F_a -mérés); a minták nagy része azonos szemcseméretű, néhány minta kevert szemcsés volt. A $K = f(F)$ függvénykapcsolatra kapott empirikus eredményei alátámasztják azt a korábban már említett tapasztalatot, hogy a kap-

csolat nem szignifikáns azonos szemcseméretű mintákra, de jellegzetesnek látszik kevert szemcsés minták esetén.



1. ábra

A $K=f(t_e)$ empirikus kapcsolatok különböző szerzők
terepi és laboratóriumi mérései alapján

- (1) Kelly (1977); (2) Heigold (1979); (3) Masac and Landa (1979);
(3a) Masac et al. (1985); (4) Urish (1981) terepen; (5) Kosinsky and Kelly (1981);
(6) Kwader (1985); (7) Urish (1981) laboratóriumi minták

Az utóbbi évtizedben a $K = f(F)$ összefüggés vizsgálatával a korábbanál jóval kevesebb közlemény foglalkozik, néhány, a témához kapcsolódó tanulmány azonban említésre méltó.

Kalinsky és mások (1993) hidraulikai vizsgálatok és felszíni elektromos szondázás alapján geostatistikai módszereket alkalmaztak egy nagykiterjedésű víztartó réteg vizsgálatára és egy agyagos vízzáró réteg helyének meghatározására.

Evans (1995) repedezett kőzetek áramlási csatornáinak hidraulikai elemzését végezte el elektromos vezetőképesség-mérések adatai alapján.

Cassiani és Medina (1997) egy metamorf eredetű repedezett kőzet víztartóban felszíni elektromos szondázás és próbaszivattyúzások eredményei alapján vizsgálta a fajlagos ellenállás és a transzmisszibilitás közötti kapcsolatokat. Értékelésük során a kettős korrelációs számítás (co-kriging) módszerét alkalmazták. Az eredmény: csökkenő $K = f(F)$ kapcsolat, meglehetősen nagy szórással és bizonytalan korrelációs kapcsolattal. A bizonytalanságok okait a szerzők a geológiai szerkezet szabálytalanságának és az agyagtartalom zavaró hatásának tulajdonítják.

Az 1. ábrán közölt empirikus kapcsolati vonalak alapján megállapítható, hogy a $K = f(F)$ függvény nem egyértékű (vagyis egyazon F -értékhez több különböző K -érték tartozhat, tehát F értékének ismerete önmagában nem elegendő K becsléséhez.)

4. Laboratóriumi kísérletek

A továbbiakban homogén üveggolyók és viszonylag homogén homokminták laboratóriumi mérései alapján vizsgáltuk a hidraulikai és az elektromos kapcsolat jellegét. A minták jellemző adatait az 1. táblázatban közöljük.

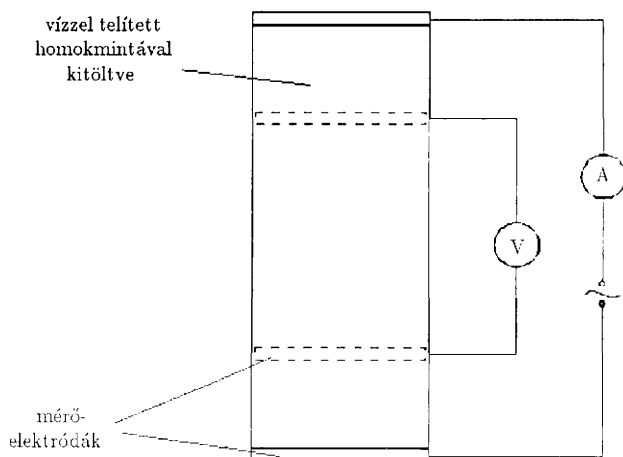
1. táblázat

Jel	D_{50} [cm]	D_h [cm]	α [—]	n [—]	K [cm s ⁻¹]	S_p [cm s ⁻¹]
G1	0,3		6	0,387	5,26	15,2
G2	0,125		6	0,414	1,85	28,6
G3	0,04		6	0,447	0,193	98,7
H1	0,12	0,102	11,5	0,387	0,240	68,8
H2	0,12	0,102	11,2	0,405	0,304	65,3
H3	0,058	0,050	13,8	0,367	0,031	175
H4	0,017	0,012	9,4	0,391	0,0052	475

A G1, G2, G3 jelű minták egyenlő átmérőjű üveggolyók, a H1, H2, H3, H4 jelű minták agyagmentes kvarchomokok. Látható, hogy a H1 és a H2

minta talajfizikai adatai csaknem azonosak; a finomabb részletekben azonban különböznek. H1 szürke, H2 enyhén vöröses színezetű volt, ami vas-oxidtartalomra utal, továbbá a mikroszkópi vizsgálat szerint H1 szemcséi porózus, H2 szemcséi sima felületűek voltak. A szivárgási tényezőt a klasszikus módszerrel, víz átáramoltatásával határoztuk meg. A szemcsék alak tényezőjét mikroszkópi alakvizsgálat alapján a Kovács (1972) által megadott módszerrel becsültük. Az S_p értékeket az (5) formula alapján, a szivárgási tényező mérési eredményeinek felhasználásával számítottuk.

A minták elektromos formatényezőjét a 2. ábrán vázolt henger alakú mérőcellában határoztuk meg. Pórusfolyadékként különböző koncentrációjú NaCl-oldatokat használtunk. A négy elektródával végzett mérés a polarizáció kiküszöbölését célozta; ez az összeállítás a négy elektródás felszíni elektromos szondázás laboratóriumi megfelelője. A fajlagos ellenállás mérést elvégeztük a tiszta elektrolitokra, majd az ugyanezekkel telített homokmintákra. A látszólagos elektromos formatényezőket a (8) formula alapján számítottuk. A fajlagos ellenállásméréseket a terepi szondázáshoz hasonlóan alacsony frekvenciájú váltóárammal végeztük.



2. ábra

Az elektromos formatényező meghatározására használt mérőberendezés vázlata

A kísérleti eredmények alapján kapott $K = f(F)$ kapcsolatok a 3. ábrán láthatók. Homokmintákra a függvénykapcsolat láthatóan bizonytalan; ráadásul a talajfizikailag csaknem azonos H1 és H2 minták közötti eltérés k_f csökkenésével egyre nő. A két minta közötti eltérés oka valószínűleg az összetétel és a szemcsefelület minőségének már említett különbségéből

adódik. Az üveggolyókra egyértelműen növekvő trend adódott, a pórusfolyadék vezetőképességétől függetlenül, bár a trend eléggé „gyenge”. Az 1. táblázatból látható, hogy a golyók hézagterfogata csökken a szivárgási tényező növekedésével, hasonlóan az Urish (1981) által vizsgált mintákhoz, a $K = f(F)$ kapcsolat is hasonlóan alakul (1. ábra). A homokminták hézagterfogatában viszont nincs észlelhető trend és a $K = f(F)$ kapcsolat trendje is bizonytalan; ez szintén megegyezik több idézett szerző, valamint más szerzők tapasztalatával.

5. A $K = f(F)$ modellek értékelése

Empirikus modell

Heigold (1979) korábban már idézett cikkében Archie nagyszámú víztartóra végzett vizsgálata alapján megállapította, hogy azokban a hézagterfogat és a szivárgási tényező között egyenes arány állt fenn. Archie adatai alapján Heigold az n és K értékek közötti empirikus kapcsolatot az alábbi alakban adja meg:

$$(15) \quad K = c_1 n^{c_2},$$

ahol a függvény növekvő jellege miatt c_1 és c_2 pozitív. Az Archie-féle (7) egyenletből a hézagterfogatra az alábbi kifejezés adódik:

$$(16) \quad n = a^{\frac{1}{m}} F^{\frac{-1}{m}}.$$

Ezt behelyettesítve és figyelembe véve, hogy egy adott formációban a és m állandó, (15) így írható:

$$(17) \quad K = AF^{-\frac{c_2}{m}},$$

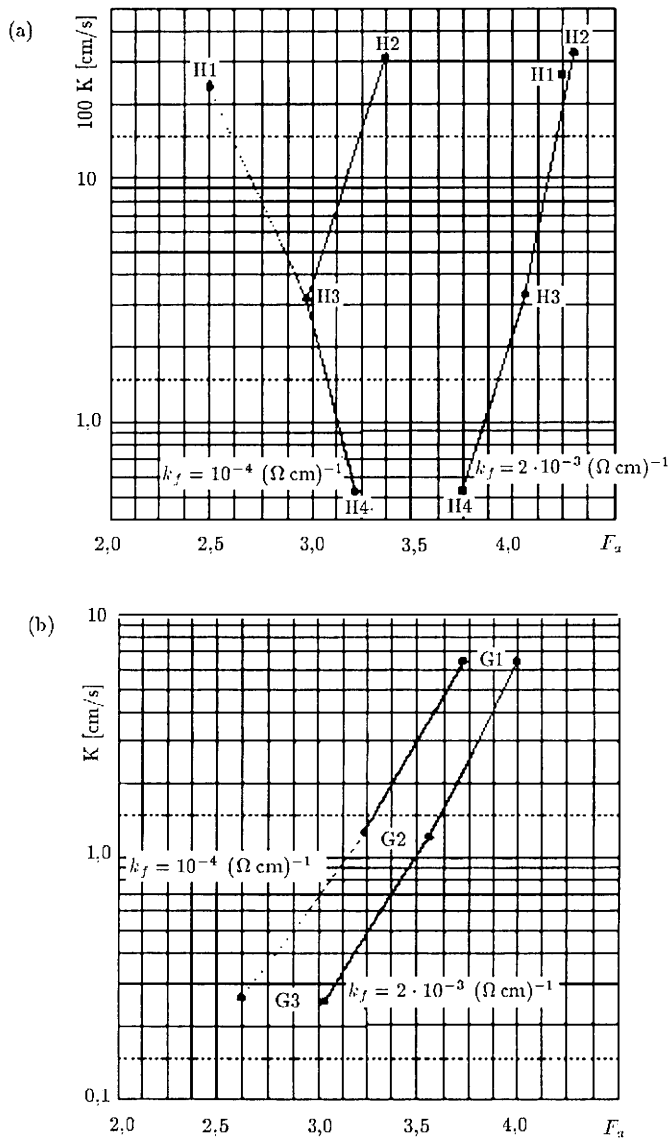
ahol

$$A = c_1 a^{\frac{c_2}{m}},$$

és A pozitív állandó.

A (17) kifejezés lényegileg a már idézett (13) egyenlettel azonos, de itt részletesebb kifejtésben. Mivel c_2 és m egyaránt pozitív, innen következik, hogy F kitevője negatív, vagyis F növekedésével K értéke csökken.

Hasonló gondolatmenettel belátható, hogy ha növekvő K értékekhez csökkenő n értékek tartoznak, akkor a (15) egyenletben c_2 negatív, vagyis a (17)-ben F kitevője pozitív, tehát F növekedésével K is nő.



3. ábra

A $K=f(F)$ kapcsolatok a laboratóriumi mérések alapján

(a) homokminták, (b) üveggolyók

Pfannkuch modellje

A (12) Pfannkuch-egyenletbe beírva Cornell—Katz (9) egyenletét és a fajlagos felület (6) kifejezését:

$$(18) \quad F_a = \frac{1}{nT + n(1-n)T \frac{k_s}{k_f} \frac{\alpha}{D_h}}.$$

Alkalmazzuk a következő jelölést:

$$B = \frac{k_s}{k_f} \frac{\alpha}{D_h}.$$

Ezzel a (18) egyenlet:

$$(19) \quad F_a = \frac{1}{nT + Bn(1-n)T}.$$

A fenti egyenlet tulajdonképpen az $F_a = f(n)$ függvénykapcsolatot fejezi ki. A (3) egyenlet viszont a $K = f(n)$ függvénykapcsolat leírása; ebből matematikailag előállítható az $n = f(K)$ függvény. Az összetett függvények differenciálási szabályát figyelembe véve, a deriváltakra érvényes a következő egyenlet:

$$(20) \quad \frac{dF_a}{dK} = \frac{dF_a}{dn} \frac{dn}{dK}.$$

A (19) egyenlet n szerinti differenciálásával:

$$(21) \quad \frac{dF_a}{dn} = -\frac{T + BT(1-2n)}{[nT + Bn(1-n)]^2}.$$

A fenti kifejezés nevezője minden esetben pozitív, számlálója pedig $n \leq 0,5$ esetén (vagyis a gyakorlatilag szóba jövő esetekben) pozitív, következésképp dF_a/dn mindig negatív. A dn/dK derivált előállításához nincs szükség az $n = f(K)$ függvényre, hiszen a deriválási szabályok alapján $dn/dK = (dK/dn)^{-1}$. Erre a differenciálhányadosra azonban a továbbiakban nincs is szükség. A fentiek alapján ugyanis dF_a/dn mindig negatív, a (20) egyenletben szereplő dF_a/dK előjele mindig ellentétes a dn/dK derivált előjelével. Kissé matematikusabban fogalmazva: ha érvényes a (20) egyenlet, továbbá $dF_a/dn < 0$, akkor

$$(22) \quad \text{sign} \frac{dF_a}{dK} = - \text{sign} \frac{dn}{dK}.$$

Figyelembe véve, hogy a pozitív derivált a növekvő, a negatív a csökkenő függvényekre jellemző, a vizsgált függvénykapcsolatok jellegét tekintve az alábbi eseteket különböztethetjük meg:

1. eset: ha dF_a/dK pozitív, vagyis az $F_a = f(K)$ függvény növekvő, akkor dn/dK negatív, vagyis a $K = f(n)$ függvény csökkenő jellegű;
2. eset: ha dF_a/dK negatív, vagyis az $F_a = f(K)$ függvény csökkenő, akkor dn/dK pozitív, vagyis a $K = f(n)$ növekvő jellegű;
3. eset: ha az $F_a = f(K)$ kapcsolatnak nincs határozott trendje, akkor az $K = f(n)$ kapcsolatnak sincs.

Az (1) esetnek felelnek meg Heigold (1979), valamint Masac és Landa (1979 és 1981) terepi mérési eredményei.

A (2) eset látszik a legbiztosabb trendnek, ide sorolhatók a saját kísérleteink közül az üveggolyós mérések, Urish (1985) terepi mérési eredményei, üveggolyókkal végzett kísérletsorozatai és főleg modelltalajokkal végzett vizsgálatai. Kwader (1985) terepi mérései szintén ebbe a kategóriákba sorolhatók, valamint Huntley (1986) homokmintákkal végzett laboratóriumi kísérletei. Ugyanide sorolhatók Shackley és Garber (1953) Mississippi-völgyi eredményei is (idézi: Mazac és mtsai, 1985).

A (3) eset bizonytalan trendjét mutatják a saját laboratóriumi vizsgálatok homokmintákkal, Huntley (1986) homogén szemcsés homokokkal végzett laboratóriumi kísérletei, valamint Kelly (1979) (idézi Huntley, 1986) homogén szemcsés, glaciális eredetű mintákkal végzett vizsgálatai.

6. Következtetések

Az irodalomból idézett számos terepi és laboratóriumi vizsgálat, valamint saját laboratóriumi méréseink eredményei valószínűsítik a szivárgási tényező és az elektromos formatényező kapcsolatára a következőket:

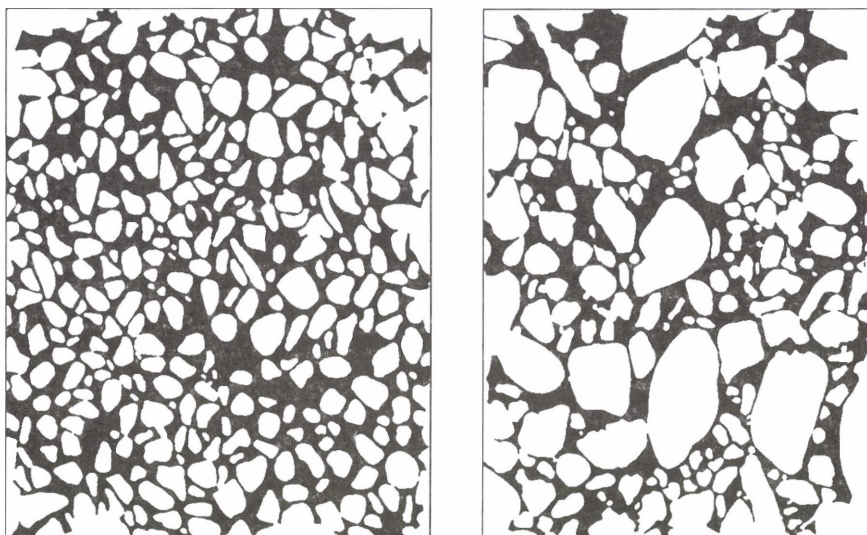
— a $K = f(F_a)$ kapcsolat nem egyértékű, ráadásul nem is egyirányú: trendje növekvő és csökkenő is lehet;

— következésképp a fenti paraméterek között nem lehet egyszer s mindenkorra érvényes függvénykapcsolatot meghatározni;

— ugyanakkor egységes hidrogeológiai formáción (régión) belül meghatározott kvantitatív kapcsolat nagy megbízhatósággal érvényes a teljes régióban szemcsés anyagú víztartók, sőt egyes esetekben repedezett (karsztos) víztartók esetén is.

Az előző fejezetben a függvénykapcsolatok jellegére bemutatott szabályszerűségek a jelek szerint általános érvényűek; a vizsgált nagyszámú esetben nem találtunk alóluk kivételt. Ezek a szabályszerűségek (a fenti 1—3. eset) a szemcseszerkezetre nézve (szemcsés anyagú víztartók esetén) a következőképpen fordíthatók le:

1. eset: a $K = f(n)$ kapcsolat csökkenő, vagyis a nagyobb szivárgási tényezőkhöz kisebb hézagtérfogat tartozik. Ez pl. úgy valósulhat meg, hogy a kevésbé áteresztő rétegek viszonylag homogén finom szemcsékből, a nagyobb áteresztő képességű rétegek durva szemcsékből és a hézagokat kitöltő finom szemcsékből állnak (4. ábra).



4. ábra

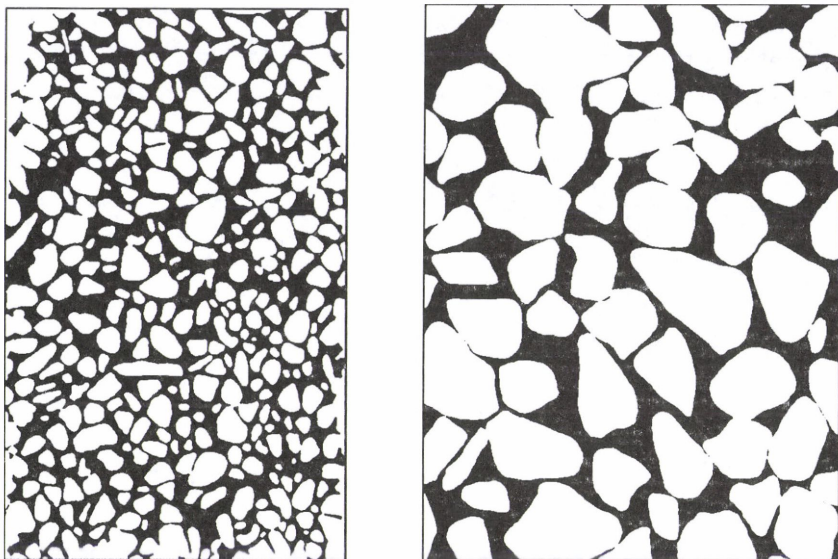
Az 1. esetnek megfelelő szemcseszerkezetek

2. eset: a $K = f(n)$ kapcsolat növekvő, vagyis a nagyobb szivárgási tényezőkhöz nagyobb hézagtérfogat tartozik. Ez pl. úgy valósulhat meg, hogy a kis áteresztőképességű rétegek durva szemcsékből és az azokat kitöltő finom szemcsékből, az áteresztőbb rétegek pedig durva szemcsékből állnak, amelyek közül a finom szemcsék (pl. áramlás okozta erózió folytán) eltávoztak (5. ábra).

(Megjegyezzük, hogy az utóbbi két ábrán szemléltetett szemcsekonfigurációk általunk korábban speciális eljárással készített homokmintametszetek.)

3. eset: nem jellemezhető a fentiekhez hasonló, karakterisztikus szemcseszerkezettel.

Ha tehát terepi mérések alapján rendelkezésre állnak egy adott területre F_a és K összetartozó értékei (pl. úgy, hogy F_a felszíni elektromos szondázás vagy karotázsmérésekből, K próbaszivattyúzásokból ismert), akkor az $F_a = f(K)$ függvény tulajdonságai alapján a fenti 1—3. esetnek megfelelően a víztartó rétegek finomszerkezetére következtethetünk.



5. ábra

A 2. esetnek megfelelő szemcseszerkezetek

Irodalom

- [1] ALGER, R. P. (1966) Interpretation of electric logs in fresh water in unconsolidated formations. 7th Annual Logging Symp. Trans. Sec. CC., pp. 1–25.
- [2] ARCHIE, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Amer. Inst. Min. Eng. Publ., No. 1422, Petroleum Technology, 8 p.
- [3] BEAR, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier, New York.
- [4] CASSIANI, G., MEDINA JR. M. A. (1997): Incorporating auxiliary geophysical data into ground water flow parameter estimation. Ground Water, No. 1, pp. 79–91.
- [5] EVANS, D. G. (1995): Inverting fluid conductivity logs for fracture inflow parameters. Water Resour. Res., No. 12, pp. 2905–2916.

- [6] GÁLFI J., LIEBE P. (1981): Az elektromos fajlagos ellenállás és a szivárgási tényező kapcsolata törmelékes vízáadó kőzetekben. Vízügyi Közlemények 4.
- [7] HEIGOLD, P. C., GILKESON, R. H., CARTWRIGHT, K., REED, P. C. (1979): Aquifer transmissivity from surficial electrical method. Ground Water. Vol. 17. No. 4. pp. 338–345.
- [8] HUNTLEY, D. (1986): Relations between Permeability and Electrical Resistivity in Granular Aquifers. Ground Water, Vol. 24. No. 4.
- [9] KALINSKY, R. J., KELLY, W. E., BOGÁRDI, I. (1993): Combined use of geoelectric sounding and profiling to quantify aquifer protection properties. Ground Water. No. 4. pp. 538–544.
- [10] KELLY, W. E. (1977): Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. Ground Water. V. 15. No. 6. pp. 420–425.
- [11] KOSINSKY, W. K., KELLY, W. E. (1981): Geoelectric soundings for predicting aquifer properties. Ground Water. Vol. 19. No. 2. pp. 163–171.
- [12] KOVÁCS GY. (1972): A szivárgás hidraulikája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972.
- [13] KWADER, T. (1985): Estimating Aquifer Permeability from Formation Resistivity Factors. Ground Water, Vol. 23. No. 6.
- [14] MASAC, O., LANDA, I. (1979): On determination of hydraulic conductivity and transmissivity of granular aquifers by vertical electrical sounding. J. Geol. Sci. Vol. 16. pp. 123–129.
- [15] MASAC, O., KELLY, W. E., LANDA, I. (1985): A Hydrogeophysical Model for Relations Between Electrical and Hydraulic Properties of Aquifers. Jour. Hydrology, Vol. 79.
- [16] PFANNKUCH, H. O. (1969): On the Correlation of Electrical Conductivity Properties of Porous Systems with Viscous Flow Transport Coefficients. 1st International Symposium on the Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media, IAHS, Haifa.
- [17] SHAW, D. J. (1980): Bevezetés a kolloid- és felületi kémiába. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [18] UJFALUDI L. (2000a): Felszín alatti víztartók szivárgási együtthatójának becslése elektromos mérések alapján. Vízügyi Közlemények 2000/2.
- [19] UJFALUDI L. (2000b): Formation factor vs. hydraulic conductivity. Interpretation of trends and conditions of field application. Proc. Int. Conf. Groundwater 2000. Copenhagen, Denmark.
- [20] URISH, D. W. (1985): Electrical Resistivity — Hydraulic Conductivity Relationships in Glacial Outwash Aquifers. Water Resour. Res. Vol. 17. No. 5.

ESZTERHÁZY KÁROLY FŐISKOLA
KÖNYVTÁRA - EGER

Könyv: 290.996

800,-

Tartalom

Előszó	3
VÉGH LÁSZLÓ: A civilizáció hatása környezetére	5
RÁCZ ERVIN: A mikrorobbantásos fúzió, avagy a jövő egy lehetséges új energiaforrása	25
VIDA JÓZSEF: A fizika tantárgy kedveltségének változása az érettségihez közeledve	41
KOVÁCH LÁSZLÓNÉ: A karika gurításának mechanikai elemzése	47
RAJKAI KÁLMÁN, R. VÉGH KRISZTINA, NACSA TIBOR: Az elektromos kapacitás, a gyökérméret és -aktivitás kapcsolata	57
UJFALUDI LÁSZLÓ: Felszín alatti víztartók elektromos formatényezője és hidrogeológiai paraméterei	73